ТРУДЫ

35-й Международной научно-технической конференции

"ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ РОБОТОТЕХНИКА"

PROCEEDINGS

of the 35th International Scientific and Technological Conference

"EXTREME ROBOTICS"

МИНОБРНАУКИ
РОССИИ

ГНЦ РФ ЦНИИ РТК

РОБОТОТЕХНИКА И ТЕХНИЧЕСКАЯ КИБЕРНЕТИКА

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Включен в базу Russian Science Citation Index (RSCI) на платформе Web of Science

Подписной индекс в каталоге «Роспечать» - **59896**

Уважаемые коллеги!

Хорошая новость для наших авторов

Журнал «Робототехника и техническая кибернетика» включен в базу данных Russian Science Citation Index (RSCI) на платформе Web of Science. Цель RSCI - создать базу научных статей из лучших и авторитетных российских журналов на платформе Web of Science. Научные журналы, принятые в эту базу по результатам экспертизы, а также статьи российских учёных, опубликованные в журналах, индексируемых в Web of Science Core Collection и Scopus, и составляют ядро РИНЦ.

Данные об издании публикуются в реферативном журнале Всероссийского института научной и технической информации Российской академии наук (ВИНИТИ РАН) (серия «Машиностроение», выпуск «Робототехника»). Журнал включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, утвержденный приказом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации от 29.05.2017 г. Журнал «Робототехинка и техническая кибернетика» входит во вторую категорию (К2) журналов, входящих в Перечень рецензируемых изданий ВАК.

Коды специальностей: 1.2.1., 1.2.2., 2.3.5., 2.3.6., 2.5.4., 2.5.9., 2.5.13.

ISSN 2310-5305 (Print)
ISSN 2312-6612 (Online)

Издатель

РТК

Журнал издается Государственным научным центром Российской Федерации федеральным государственным автономным научным учреждением «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики» (ЦНИИ РТК)

Адрес редакции: Россия, 194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., 21, тел.: +7(812)552-13-25,
zheleznyakov@rtc.ru, www.rusrobotics.ru t.me/journal_RTC (новости робототехники)

ТРУДЫ

35-й Международной научно-технической конференции

«ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ РОБОТОТЕХНИКА»

29-30 октября 2024 года,
Санкт-Петербург, Россия

PROCEEDINGS

of the 35th International Scientific and Technological Conference

«EXTREME ROBOTICS»

October 29-30, 2024,
Saint Petersburg, Russia

er.rtc.ru

УДК 004.896:007.5
ББК 32.813
Э41

Э41 «ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ РОБОТОТЕХНИКА» международная научно-техническая конференция. Труды 35-й Международной научно-технической конференции «ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ РОБОТОТЕХНИКА», 29-30 октября 2024 г. – Санкт-Петербург: Изд-во: ЦНИИ РТК, 2024. – 518 с. – 10.31776/ConfER.35.2024.

Материалы сборника отражают круг актуальных проблем и задач в сфере робототехнических систем и средств безопасности, представленных на 35-й Международной научно-технической конференции «ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ РОБОТОТЕХНИКА». Доклады опубликованы в авторской редакции.

УДК 004.896:007.5
ББК 32.813

Труды опубликованы в авторской редакции

Дизайн и верстка Ирины Купцовой, kuptzova@rtc.ru

Proceedings of the International Scientific and Technological Conference EXTREME ROBOTICS. — 518 p. — 10.31776/ConfER.35.2024

Proceeding’s materials highlight an array of challenging issues and tasks in the sphere of robotic systems and safety facilities discussed at the 35th International Scientific and Technological Conference «EXTREME ROBOTICS». Papers are published with author's edition.

Proceedings are published with author's edition

ISSN 2658-7645

© ЦНИИ робототехники и технической кибернетики, 2024
© The Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics, 2024

ОРГАНИЗАТОРЫ

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ
И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

РТК

Государственный научный центр Российской Федерации
«Центральный научно-исследовательский
и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики»
(ГНЦ РФ ЦНИИ РТК),
Санкт-Петербург

ОГЛАВЛЕНИЕ

СЕКЦИЯ «НАЗЕМНАЯ РОБОТОТЕХНИКА»

Расширение программных и динамических возможностей
сервисных роботов на гусеничной платформе
*В.Е. Пряничников, Ю.С. Колесов, А.В. Плотников, Д.С. Тележкин,
Д.К. Федотов, Е.В. Хрисанфов*.....10

Определение геометрических параметров препятствия на пути
мобильного робота с использованием системы технического зрения
В.А. Кравчук, А.Е. Архипов.....15

Мехатронные привода в тормозной и рулевой системах электротранспорта
М.А. Малкин, А.С. Переладов, А.М. Щербин.....22

Контроль эффективности и надежности системы комплексной безопасности
для обеспечения защищенности доверенных иммерсивных интерфейсов
взаимодействия робота и оператора
В.А. Саяркин, В.Р. Виноградов, И.Б. Паращук.....27

Автономный наземный робот для доставки грузов вне помещения
А.В. Бянкина, М.В. Тарачков, А.И. Кошелев, К.В. Маракулин.....32

Робототехнические стартапы в России: основные направления,
проблемы и возможности
М.М. Миронов.....38

Автоматическое обнаружение и захват заранее заданных объектов
манипулятором мобильного робота
С.А. Собольников, Н.А. Куликов, Д.Д. Подколзин.....43

Поиск технических решений для погрузочно-разгрузочных работ
с применением роботизации
С.Г. Ласточкин.....51

Проектирование захватного устройства с силовым очувствлением
Д.О. Дохов, Н.В. Заруцкий, Е.В. Касимцева.....55

Оценивание параметров трения в шагающих многозвенных роботах
методом динамического расширения регрессора и смешивания
Н.В. Михальков, А.А. Пыркин.....62

Управление с использованием скользящего режима для мобильной платформы
в экстремальных условиях
Ч.А. Фам, С.И. Неделчев.....70

Роботизированный комплекс безопасности жизнеобеспечения
пунктов временного размещения населения в чрезвычайных ситуациях
И.О. Прутчиков, В.В. Камлюк, С.А. Терентьев, И.В. Гречушкин.....75

Перспективы создания и применения мобильных робототехнических комплексов
мониторинга состояния технических систем объектов критической инфраструктуры
И.О. Прутчиков, В.В. Камлюк, С.А. Терентьев, И.В. Гречушкин.....80

Разработка системы управления комфортом пассажиров с учетом скорости
на основе данных наблюдений для общественного транспорта
Язан Вассуф, Г.В. Цокуренко, К.Г. Мещерин, В.В. Серебренный.....86

Моделирование мобильного робота «ЛИРС-ArtBul-2» в симуляторе Gazebo
А.А. Апурин, Е.А. Магид.....99

Особенности радиолинии управления роботом-водителем на автомобиле-мишени
С.С. Мырзажанов, А.Ю. Гетманцев, Т.В. Меньшакова 104

Построение карты глубины сцены на основе данных стереопары
А.А. Жиленков, О.С. Крупинин, Д.М. Пимонов..... 113

Система навигации для испытаний беспилотных наземных
роботизированных комплексов
Г.М. Исраелян, Е.О. Гаранин, А.А. Назаров 119

Разработка мобильной роботизированной платформы botANNIC
С.А. Сенкевич, Д.А. Бобров, В.А. Бугров 125

СЕКЦИЯ «МОРСКАЯ РОБОТОТЕХНИКА»

Перспективная модель применения автономного необитаемого подводного аппарата
с использованием управляемого изменения крена
Л.А. Мартынова, И.В. Пашкевич..... 130

Перспективы развития морских робототехнических комплексов
с учётом группового применения
А.С. Проценюк, И.Б. Калинин 137

Надводный автономный дрон для информационно-навигационного
обеспечения водолаза
А.А. Тузова, А.Г. Кузнецов, А.М. Назаров, С.С. Гойман, И.В. Кожемякин..... 142

Мониторинг относительного положения автономных подводных аппаратов
в группе на основе анализа больших уклонения
С.А. Дубовик, А.А. Кабанов, И.Ю. Липко 150

Разработка технологии сопряженных расчетов динамики подводного
реконфигурируемого аппарата и гидродинамики, обтекающей его жидкости
К.К. Забелло, Н.А. Щур 157

Трёхмерное численное моделирование движущихся рядом подводных аппаратов
Н.А. Щур, А.А. Пожилов..... 162

Формирование сценариев действий робототехнических комплексов в виртуальной среде
И.С. Бунар, А.Г. Любимов, И.К. Петушок 170

Исследование влияния особенностей аддитивного производства
пластиковых элементов конструкции на ресурс роборыбы
Г.В. Казанцев..... 176

Обоснование архитектурного облика системы группового управления роботами спасателями
Е.К. Игнатиади, П.К. Шубин, М.В. Кулешова, Е.В. Павлов 180

Исследование и разработка системы стабилизации длиннофокусной камеры
мобильного робота
А.В. Мымрин, В.В. Варлашин..... 187

Математическое моделирование управляемого движения подводного манипулятора
при перемещении груза
В.А. Леонтьев 192

Синтез алгоритмов управления биоморфным подводным роботом
с использованием концепции вложенных моделей
Д.К. Серов, Н.П. Коренко, Е.Ю. Смирнова 201

СЕКЦИЯ «РОБОТИЗАЦИЯ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ»

Автоматизация технологического процесса отбора и разбавления проб теплоносителя первого контура ядерного реактора
А.В. Шайтанов 208

Цифровизация экспериментов на стендах для критических сборок
С.А. Андреев, С.Ю. Касьянов 216

Опыт применения РТК при отработке технологии демонтажа конструкций остановленного уран-графитового реактора
А.О. Павлюк, Е.В. Беспала, С.Г. Котляревский, Е.С. Падерин, А.А. Шешин, А.Э. Риф, Р.И. Кан 221

СЕКЦИЯ «ТЕХНОЛОГИИ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА И ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ РАЗРАБОТКИ В РОБОТОТЕХНИКЕ»

Искусственный разум робота: функциональность и средства реализации
Л.А. Станкевич, А.М. Корсаков 228

Научно-практический опыт разработки и применения систем доверенного искусственного интеллекта в решении задач обеспечения пожарной безопасности кораблей ВМФ
И.В. Образцов 237

Применение технологий искусственного интеллекта для очувствления технического состояния электроаппаратуры мобильных робототехнических комплексов в процессе мониторинга
М.Е. Данилин, О.П. Меньшиков 246

Программная система для решения задач понимания изображений в реальном времени
К.И. Кий 250

Возможности применения игрового имитационного моделирования для обучения нейронных сетей
В.Е. Иванов, Н.Г. Яковенко 256

Экспериментальная оценка нейронных сетей в единой технологической среде
В.С. Авраменко, Е.С. Чичков 266

Классификация сегментированных областей на основе векторов признаков
В.Д. Матвеев, А.Е. Архипов, И.С. Фомин 271

Экспериментальные исследования применения искусственного интеллекта в системе робот-робот
В.Е. Вавилов, А.А. Хусаинова, Б.В. Галицков, О.М. Ахунов, М.С. Максимов, В.А. Нугаев, Р.Р. Хазиев 276

Применение архитектуры CLIP в задаче распознавания сцен для локализации мобильного робота
А.Д. Московский 287

Перспективы использования виртуальной среды для первичного тестирования технологий ИИ и алгоритмов автономного управления робототехнических комплексов различного базирования
М.Е. Данилин, О.П. Меньшиков, И.И. Инин, К.Р. Ахтямов, К.Н. Юсупова 294

Гибридный алгоритм распознавания объекта в системе компьютерного зрения
С.О. Власов, А.А. Богуславский, С.М. Соколов 300

Нейроморфный механизм управления заданием по результатам анализа ситуации
В.В. Иванова, А.А. Демчева, А.М. Корсаков 308

Автоматизация процесса подготовки данных для обучения нейронных сетей
классификации гиперспектральных данных объектов
В.А. Юдаев, А.А. Комиссаров, А.С. Егоров..... 316

Увеличение скорости вычислений при компьютерном моделировании
движения механической системы
И.М. Портнов, А.А. Медведева 322

Расширение функционала поисковых роботов для обнаружения
необходимого пользователям контента на информационных ресурсах
систем хранения и обработки данных специального назначения
Е.С. Крюкова, Л.А. Саяркин, И.Б. Паращук..... 330

СЕКЦИЯ «МЕДИЦИНСКАЯ РОБОТОТЕХНИКА»

Роботизированная система для сердечно-сосудистых вмешательств
Д.Ю. Колпащиков, О.М. Гергет..... 335

О перспективах применения умных ортопедических имплантов
А.И. Мельникова, А.В. Синегуб..... 339

Двухслойные медицинские фантомы позвонков с регулируемыми характеристиками
путём изменения состава применяемых материалов
М.Э. Коновалов, А.А. Воротников, Е.О. Лопухов, Ю.В. Подураев,
А.А. Гринь, О.В. Левченко 344

Направления для анализа интраоперационных данных
транспедикулярной фиксации с помощью программного комплекса
Ю.Н. Куликов, А.А. Воротников, Е.О. Лопухов, Ю.В. Подураев, А.А. Гринь, О.В. Левченко 351

СЕКЦИЯ «КОСМИЧЕСКАЯ РОБОТОТЕХНИКА»

Исследования особенностей выполнения космонавтами совместной
операторской деятельности по применению антропоморфного робота
совмещенного с мобильной платформой в режиме телеуправления
в длительных космических экспедициях
В.А. Дикарев, А.Н. Симбаев, А.Ю. Кикина, Ю.С. Чеботарев, И.А. Буковская, Э.В. Никитов 359

Интерфейс дополненной реальности для совместных операций космонавтов
и автономных мобильных роботов на лунной поверхности
И.Н. Куликов, Б.И. Крючков, В.М. Усов..... 362

Исследование влияния оптимизации регулируемой физической жёсткости
шарниров манипулятора
И.В. Шардыко, В.В. Титов 366

Применение метода наименьших квадратов для нахождения взаиморасположения
осей вращения двухосной поворотной платформы
Т.П. Романенко, В.В. Варлашин, Н.В. Заруцкий..... 373

Автономные орбитальные роботизированные станции для сбор
космического мусора на основе технологий искусственного интеллекта
Е.С. Квас, А.А.В. Мельницкая, В.В. Назаренко, М.В. Бутусов, А.В. Степанов, А.В. Рысин 379

СЕКЦИЯ «ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ РОБОТОТЕХНИКА»

Многопользовательская игровая платформа для формирования интереса
у молодежи к робототехнике
А.Н. Богданов, Д.И. Шайхезадин, Н.С. Шаронов 386

Виртуальная реальность как инструмент для подготовки операторов
беспилотных летательных аппаратов
М.Ю. Серебряков 391

Методическое обеспечение образовательной деятельности
в области робототехники и БПЛА: современный подход
М.Е. Данилин, О.П. Меньшиков, К.Н. Юсупова, К.Р. Ахтямов, И.И. Инин 397

Образовательный роботехнический комплекс для студентов
Е.В. Лебедева, В.А. Ложкин, М.С. Моисеенко 401

Многофункциональный лабораторный стенд
для исследования сенсорных и управляющих систем роботов
В.П. Андреев, В.В. Майоров 408

От фабрики-конструктора к реальному производству:
комплексное обучение робототехнике для школьников
О.Б. Сенацкая, М.В. Загорин 414

Подготовка и проведение робототехнической олимпиады в виртуальной среде
А.Ю. Овсянников, И.А. Статкевич, А.В. Малолетов 419

Организация кружка робототехники с детьми, оказавшимися
в трудной жизненной ситуации
А.А. Борисова, И.А. Муртазин 423

Робототехника и образование: школа, университет, производство
А.В. Ащеулова 427

Разработка образовательного реконфигурируемого мобильного
робототехнического комплекса для проведения командных,
научно–технических и инженерных соревнований
П.А. Таганов, Н.П. Коренко, А.В. Печуркин, И.В. Сеньковски 432

СЕКЦИЯ «БЕСПИЛОТНЫЕ АВИАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ»

Коррекция показаний магнитометра БПЛА с использованием метода
динамического расширения регрессора и смешивания
Н.В. Михальков, А.А. Пыркин 437

Альтернативные способы автономной навигации БАС
в условиях отсутствия сигналов спутниковых навигационных систем
М.Е. Данилин, О.П. Меньшиков, К.Р. Ахтямов, И.И. Инин, К.Н. Юсупова 444

Применение роботизированного комплекса в управлении дорожным движением
Д.С. Букатов, А.Ю. Недякин 448

Моделирование динамики беспилотного планера и аэродинамики потока
при удержании в набегающем потоке над клином
Н.А. Щур 453

СЕКЦИЯ «ПРОМЫШЛЕННАЯ И ЛОГИСТИЧЕСКАЯ РОБОТОТЕХНИКА»

Реверсионное конструирование оптимальных управлений движением объектов
А.И. Бохонский, Н.И. Варминская 459

Траекторное планирование движения при резервировании
контуров управления пятизвенным манипулятором параллельной структуры
К.В. Грищенко 466

Алгоритм распределения задач в последовательной
производственной цепочке на основе диффузионного алгоритма
Д.Н. Воронцов 472

Особенности проектирования горнотехнических систем с автономным
и дистанционно управляемым оборудованием в связи с добычей
твердых полезных ископаемых подземным способом в условиях экстремальных сред
Д.Н. Радченко, В.С. Федотенко, А.П. Аверин 479

Топологическая оптимизация экзоскелетного каркаса
И.С. Барынкин 484

Экзоскелет для производственных и складских работ
Г.В. Савинков, А.С. Попов 490

Разработка оптической системы с вынесенным входным зрачком
для высокотемпературной камеры технического зрения
Т.Н. Шемигон, А.И. Михайловский, Б.Н. Добряков 495

Проблемы разработки интеллектуальных систем управления двигателями
переменного тока
А.К. Голубев, В.М. Фомин, А.К. Иванов 500

К вопросу о логике анализаторов цепочек поставок
для предприятия лесопромышленного комплекса
А.А. Еленская, С.С. Колмогорова, А.Л. Стариченков 504

Мобильная робототехническая платформа, возводимая
по технологии быстрореагирующего производства
С.В. Соленый, Е.С. Квас, А.В. Рысин, В.П. Косов, О.Е. Фёдоров, В.В. Назаренко 509

Расширение программных и динамических возможностей сервисных роботов на гусеничной платформе

В.Е. Пряничников[1,2,3]✉, А.В. Плотников[1,2]✉, Д.С. Тележкин[1], Д.К. Федотов[1], Ю.С. Колесов[1], Е.В. Хрисанфов[2]

[1]Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук» (ИПМ им. М.В.Келдыша РАН), Москва, Россия
[2]Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»(ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»), Москва, Россия
[3]ФГБОУ ВО Международный институт новых образовательных технологий РГГУ (МИНОТ), Москва, Россия, v.e.pr@yandex.ru, plotnikov.workmail@yandex.ru

Аннотация
При разработке мобильных сервисных роботов (МСР) и робототехнических комплексов большое значение имеет дистанционное сенсорное взаимодействие с объектами внешней среды и соответствующая интеллектуализация систем управления (СУ), расширяющая функциональные возможности, в том числе за счёт улучшения взаимодействия с операторами и персоналом, включая обеспечение возможности исполнения даже недостаточно конкретизированных заданий, ориентирование по голосу людей, перемещение или обслуживание объектов, транспортировка, физическая поддержка пациентов в госпиталях и предоставление им руководств или информации, уход, уборка и т.п. Для этого требуется реализовать алгоритмы следования по предварительно заданному маршруту, указанному маркерами или внешними командами управления, в том числе для решения логистических задач. В рамках проекта «Интеллектуальная роботроника» нами разрабатывались гусеничные МСР различного назначения, транспортные промышленные роботы и комплекты цеховой автоматики, СУ подводным шагающим аппаратом, решались проблемы интеллектуализации СУ МСР, опираясь на результаты этих наших разработок.

Ключевые слова
Мобильные сервисные роботы, удаленная разработка, Docker, виртуальный сервер, кинетостатика, динамика робота.

Expanding the software and dynamic capabilities of service robots on a tracked platform

Valentin E. Pryanichnikov[1,2,3], Aleksei V. Plotnikov[1,2]✉, Dmitriy S. Telezhkin[1], Dmitriy K. Fedotov[1], Yury S. Kolesov[1], Evgeny V. Khrisanfov[2]

[1]Keldysh Institute of Applied Mathematics of Russian Academy of Sciences (KIAM RAS), Moscow, Russia
[2]Moscow State University of Technology «STANKIN», Moscow, Russia
[3]International Institute of New Educational Technologies RSUH, Moscow, Russia, v.e.pr@yandex.ru, plotnikov.workmail@yandex.ru

Abstract
When developing mobile service robots (MSRs) and robotic complexes, remote sensory interaction with environmental objects and appropriate intellectualization of control systems (CS) are of great importance, expanding functionality, including improving interaction with operators and personnel, including ensuring the ability to perform even insufficiently specified tasks, orientation by human voice, movement or facility maintenance, transportation, physical support of patients in hospitals and providing them with guidance or information, care, cleaning, etc. This requires implementing algorithms for following a predetermined route indicated by markers or external management teams, including for solving logistical problems. Within the framework of the Intelligent Robotronics project, we developed tracked MSRs for various purposes, industrial transport robots and shop automation kits, SU underwater walking apparatus, solved the problems of intellectualization of CS MSRs, based on the results of these developments.

Key words
Mobile service robots, remote development, Docker, virtual server, kinetostatics, robot dynamics.

Введение

В работе рассмотрены особенности применения дистанционных сенсоров, в которых среда распространения сигналов вносит существенные искажения и задержки. Для их компенсации разрабатывались математические модели ультразвуковой локации, цифровые двойники, на которых тестировались алгоритмы и проводилось обучение в Международном институте новых образовательных технологий РГГУ. Одной из основных

проблем является выстраивание корректных обратных связей в системе управления (СУ), синхронизация работы сенсорных и исполнительных устройств. Рассмотрим характерные интервалы времени получения данных: круговой скан лидара считывается за 80-110 мс, цикл обновления изображений от видеокамеры — 40 мс, ультразвуковые и ИК дальномеры дают измерения за 90-140 мс и 25 мс. Таким образом, при скоростях перемещения МСР до 1,7 м/с обновление показаний всех сенсоров происходит не более чем за 150 мс, поэтому характерное время цикла управления (обновления команд в СУ) выбрано равным 100 мс, при этом робот перемещается на расстояние до 10см. Если ориентироваться на маломощный бортовой микропроцессор типа Расбери, то экстраполяция и интерполяция показаний всех сенсоров должная укладываться в 0.1 с, обеспечивая предсказание положения робота минимум на 10 см вперёд (см. также [1-5]). Для обеспечения этого были предложены [4] рекуррентные скользящие фильтры, которые при реализации на микропроцессоре занимают лишь несколько арифметических операций для выдачи очередных показаний. Эти фильтры совмещаются с работой следящей системы, что позволяет избежать искажений управляющих воздействий при минимуме вычислений. Для идентификации объектов популярны нейронные сети (НС), которые, хотя и используют значительные ресурсы, но могут обеспечить высокие скорости обработки. Остановимся на использовании нами НС с сокращенной базой, для обеспечения их работы на маломощных нетбуках и микропроцессорах. Показания сенсоров пропускаются через алгоритм свертки в 2D изображения для использования нейросетевой технологии при идентификации объектов [1]. Проведенные эксперименты по оценке процедур согласования частот опроса сенсоров и цикла управления за счет экстраполяции и интерполяции данных, показали возможность обеспечения реального времени в СУ МСР и минимизацию вычислений. При этом все основные программно-аппаратные решения СУ МСР могут реализовываться на наиболее распространенных микропроцессорах. Далее подробнее рассмотрены проблемы создания программной среды для разработок и технология улучшения динамических возможностей сервисных роботов при осуществлении захватов тяжелых предметов. В работах [6-9] рассмотрены приложения наших разработок.

Создание виртуальной среды для удаленной разработки программного обеспечения роботов

Рассмотрим использование виртуальных частных сетей и локальных серверов в процессе разработки программного обеспечения для автономных мобильных роботов. Эти технологии значимы для обеспечения эффективной и безопасной работы. В условиях, когда выделение статических IP-адресов для удаленного доступа к мобильным устройствам затруднено, создание виртуальной сети с помощью NetBird [10] на базе WireGuard [11] позволяет интегрировать все устройства в единую локальную сеть. Это упрощает взаимодействие между разработчиками и тестируемыми роботами, обеспечивая надежное и быстрое соединение, критичное для отладки и улучшения качества программного обеспечения (ПО).

Использование NetBird предоставляет возможность удаленной работы с роботами, обеспечивая разработчикам доступ с любых устройств и позволяя тестировать и корректировать ПО в реальном времени. Это особенно важно при работе в распределенных командах, где физическое размещение участников не должно влиять на ход разработки. Безопасность соединения, обеспечиваемая шифрованием и контролем доступа, защищает данные от угроз и утечек.

Локальный сервер выполняет несколько ключевых функций, которые делают его незаменимым в процессе разработки и тестирования ПО для мобильных роботов. Он поддерживает создание и тестирование новых функций в контролируемой среде, снижая риск ошибок и неисправностей, которые могут повлиять на безопасность и работоспособность роботов. Реальное время обработки данных, которые поступают от сенсоров роботов, позволяет серверу эффективно анализировать и координировать действия устройств, что особенно важно в сложных системах, таких как складская логистика, где роботы должны действовать синхронно.

Хранение данных локально на сервере позволяет изолировать их от внешних угроз, а централизованное управление обновлениями обеспечивает быстрое внедрение новых функций и исправлений. Локальный сервер также позволяет симулировать сценарии работы роботов, что помогает оптимизировать алгоритмы и стратегии до их применения в реальных условиях, значительно экономя время и ресурсы.

Перечислим основные реализуемые функции сервера.

1. *Управление кодом и версиями с помощью GitLab:*
   - хранение всех версий кода, что позволяет быстро откатываться к предыдущим версиям в случае ошибок;
   - управление ветками кода для разделения работы над новыми функциями и над исправлением ошибок.

2. Автоматическое тестирование и CI/CD (непрерывная интеграция и доставка):
   - автоматическое выполнение тестов при каждом изменении в коде, что позволяет сразу выявлять ошибки;
   - запуск тестов для проверки производительности и совместимости нового кода с существующими модулями;
   - автоматическое развёртывание проверенного кода на роботе (через VPN) после успешного прохождения тестов.

3. *Обработка данных и логирование:*
   - хранение логов для отслеживания работы робота и диагностики ошибок;

– анализ данных с сенсоров, что помогает оптимизировать алгоритмы и повышает точность выполнения задач роботом;
– мониторинг производительности, что позволяет отслеживать состояние системы и выявлять узкие места.

Docker [12] играет важную роль в управлении приложениями на сервере, предоставляя удобные средства для изоляции, портативности и быстрого развертывания приложений. Контейнеризация упрощает управление зависимостями и повышает эффективность использования ресурсов, позволяя разработчикам сосредоточиться на создании качественного ПО без лишних технических сложностей.

В целом, интеграция виртуальных сетей, локальных серверов и контейнеров Docker формирует мощную инфраструктуру для разработки, тестирования и эксплуатации ПО для автономных мобильных роботов, обеспечивая надежность, безопасность и гибкость системы. Созданная нами система распределенных вычислений позволила создать не только эффективный инструмент для ведения коллективных разработок, но и для комбинирования возможностей бортовых вычислителей с возможностями сервера [13, 14].

Одним из созданных инструментов стала разработка интерфейса начальной загрузки прошивки сервисного робота для настройки работы встроенного программного обеспечения. Формирование пользовательского интерфейса обеспечило управление параметрами начального старта и хранение этих параметров для использования загрузчиком.

Программно-аппаратная платформа сервисного робота включает в себя:
– процессорную плату на базе Rapsberry Pi;
– загрузчик первого уровня (Uboot) и загрузчик второго уровня;
– ОС Raspbian;
– встроенное программное обеспечение управления роботом.

Встроенное программное обеспечение управления роботом обеспечивает процедуру 2-х стадийной загрузки. Загрузчик первого уровня передает управление загрузчику второго уровня (миниатюрному ядру операционной системы с программной оболочкой). Эта оболочка предоставляет минимальные средства отладки и диагностики и настройки начальных параметров.

Для обеспечения работы аппаратуры робота требуется установить следующие параметры аппаратуры робота:
– параметры платы Rapsberry Pi (настройка сетевых интерфейсов, ввода-вывода, памяти, процессора, GPIO);
– параметры периферии (манипулятора, лидара, датчиков, камеры, аккумуляторов).

Управление параметрами первоначального загрузчика Uboot осуществляется через переменные окружения (ограниченное подмножество) или через последовательный порт.

Управление параметрами робота с помощью загрузчика 2-го уровня осуществляется по сети или с помощью графической или текстовой консоли. Разработано управление параметрами процессорной платы Pi4 и периферии робота, при этом на SPI flash хранятся только измененные параметры для увеличения надежности системы. Используется формат JSON для хранения параметров робота. Пользовательский интерфейс формируется на основе JSON файла, парсер JSON встроен в загрузчик второго уровня (разработана компактная реализация на чистом C). Загрузчик первого уровня (модификация U-boot) хранит параметры в оперативной памяти. В ядро загрузчика второго уровня через bootinfo передаются адрес и размер параметров. JSON файл с параметрами передается через драйвер forensic memory.

Применение кинетостатического анализа при прогнозировании результатов движения робота

Одной из функций мобильных [15] сервисных роботов различных конструкций является оперирование объектами в пространстве с использованием встроенного в робот манипулятора.

К конструктивным факторам, препятствующим выполнению мобильным роботом с манипулятором можно отнести предел насыщения приводов манипулятора робота и возможность опрокидывания робота.

Определить допустимые моменты на приводах манипулятора робота можно с помощью решения обратной задачи динамики.

Для мобильных роботов известен подход на основе кинетостатического оценивания устойчивости, и на основе 3D моделей (работы Д.Е. Охоцимского, Ю.Ф. Голубева, В.Е. Пряничникова и других [16-18]).

Анализ динамики возможно выполнить не только с помощью сторонних систем [19] или уравнений Лагранжа [6, 7], но и используя принципы, основанные на уравнениях кинетостатики [20].

Используя уравнения кинетостатики, можно сформировать систему управления [21] (рис. 1), которая бы обеспечивала увеличения запаса устойчивости при выполнении операций захвата тяжелых объектов мобильным роботом путем управления движением манипулятора и с использованием дополнительного ускорения платформы для увеличения запаса устойчивости [8].

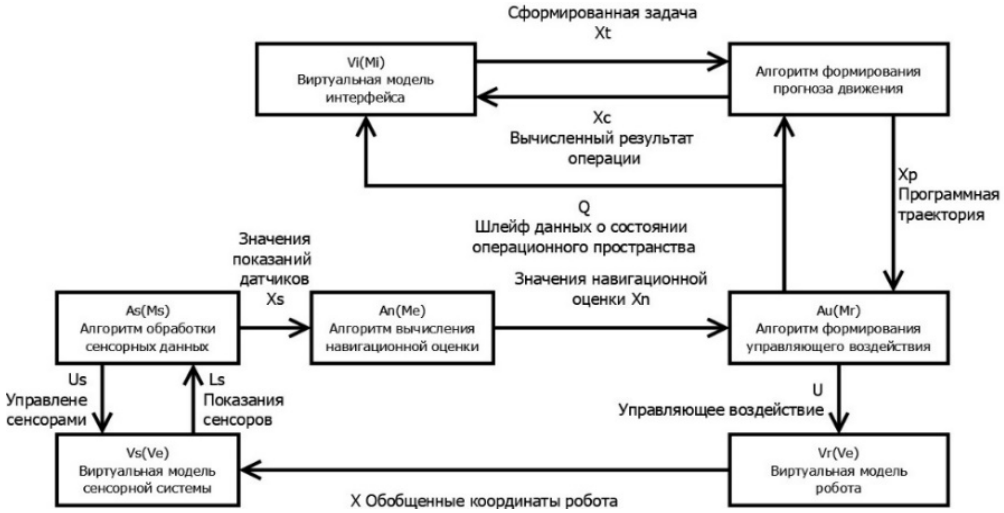


Рисунок 1 — Структура информационно управляющих процессов в мобильном роботе с включенным блоком прогноза результатов движения

Заключение

В работе рассмотрены проблемы создания программной среды для разработок сенсорно-управляющих систем мобильных сервисных роботов, а также технология улучшения динамических их возможностей при осуществлении захвата тяжелых предметов за счёт прогнозирования последствий выполнения движений манипулятора с применением кинетостатического анализа. Приложения наших разработок рассмотрены в работах [2-9].

Литература

1. Пряничников В.Е., Ястребов В.В. Способ свёртки изображений для последующей идентификации объектов сервисными роботами / Запись и воспроизведение объёмных изображений в кинематографе, науке, образовании, медиа и в других областях: XVI ежегодная научно-практической конференция**.** Материалы и доклады, часть II // Под общей редакцией О.Н. Раева. — Москва : ИПП «КУНА», 2024 С.128-135, (УДК 681.5 ББК 32.965), ISBN 978-5-98547-148-9, https://www.rsuh.ru/education/minot/conf_3d-2024.php.

2. Давыдов О.И., Пряничников В.Е. Архитектура системы управления мобильного сервисного робота. //Информационно-измерительные и управляющие системы, №7, т.13, 2015, стр.41-50.

3. Davydov D.V., Eprikov S.R., Kirsanov K.B., Pryanichnikov V.E. (2017). Service Robots Integrating Software and Remote Reprogramming, Proceedings of the 28th DAAAM International Symposium, pp.1234-1240, B. Katalinic (Ed.), Published by DAAAM International, ISBN 978-3-902734-11-2, ISSN 1726-9679, Vienna, Austria DOI: 10.2507/28th.daaam.proceedings.172.

4. Пряничников В.Е. Совмещение фильтрации ультразвуковых данных и программного управления линейным приводом / Пряничников В.Е.// Приборы+автоматизация. − 2008. − № 12. − С. 22−29.

5. Aryskin, A[leksander] & Pryanichnikov, V[alentin] (2022). Creation of Technology for Building Automated Production With Remote Control (Industry 4.0 Concept), Proceedings of the 33rd DAAAM International Symposium, pp.0279-0284, B. Katalinic (Ed.), Published by DAAAM International, ISBN 978- 3-902734-36-5, ISSN 1726-9679, Vienna, Austria DOI: 10.2507/33rd.daaam.proceedings.038.

6. Н.Г. Шаронов, В.Е. Пряничников, Н.В. Коломин, М.Ю. Ветлицын. Методы управления двигателями мобильного робота с кинематически связанными цикловыми шагающими движителями / известия ВолгГТУ, Серия Роботы, мехатроника и робототехнические системы. Волгоград: ВолгГТУ, 2024, № 4 (287), С.88-94, ISSN 1990-5297, DOI 10.35211/1990-5297-2024-4-287-88-94 (УДК 621.865.8).

7. В.Е. Пряничников, А.А. Арыскин, Ю.С. Колесов, А.Я. Ксензенко, С.В. Кувшинов, А.В. Плотников, М.Д. Соловьёва, Р.Б. Тарасов, Д.С. Тележкин, Д.К. Федотов, К.В. Харин, В.В. Ястребов. КОМПЛЕКС БАЗОВЫХ СЕНСОРНО-УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ МОБИЛЬНЫХ СЕРВИСНЫХ РОБОТОВ. - XVI Всероссийская мультиконференция по проблемам управления (МКПУ-2023): материалы мультиконференции (г. Волгоград, 11–15 сентября 2023 г.). В 4 т. Т. 1. Робототехника и мехатроника (РиМ-2023) / редкол.: И. А. Каляев, В. Г. Пешехонов, С. Ю. Желтов [и др.]. – Волгоград: ВолгГТУ, 2023. – 308 с., С.204-207, ISBN 978-5-9948-4703-9 ISBN 978-5-9948-4704-6 (Т. 1) https://www.elibrary.ru/query_results.asp.

8. Pryanichnikov, V[alentin]; Mariia, S[oloveva]; Chernyshev, V[adim] & Kalinin, Y[aroslav] (2023). Analysis and Modernization of the Dual Manipulator of Service Robots, Proceedings of the 34th DAAAM International Symposium, pp.0324-0329, B. Katalinic (Ed.), Published by DAAAM International, ISBN 978-3-902734-41-9, ISSN 1726-9679, Vienna, Austria DOI: 10.2507/34th.daaam.proceedings.043.

9. Yastrebov, V[yacheslav]; Pryanichnikov, V[alentin]; Chernyshev, V[adim] & Sharonov, N[ikolay] (2023). Approaches to Implementation of the 3D Laser Scanning to Ensure the Search and Docking of Autonomous

Underwater Robots with a Walking Base, Proceedings of the 34th DAAAM International Symposium, pp.0035-0039, B. Katalinic (Ed.), Published by DAAAM International, ISBN 978-3-902734-41-9, ISSN 1726-9679, Vienna, Austria DOI: 10.2507/34th.daaam.proceedings.005.

10. NetBird - проект, для создания виртуальных частных сетей (VPN) с использованием технологии WireGuard, ссылка на 18.09.2024. URL: https://netbird.io/.

11. WireGuard VPN общего назначения с современной криптографией, ссылка на 18.09.2024. URL: https://www.wireguard.com/.

12. Docker – среда контейнеризации приложений, ссылка на 18.09.2024. URL: https://www.docker.com/

13. В.Е.Пряничников, А.А.Арыскин, А.А.Драчкова, К.Э.Брундукова, О.И. Власова, А.А.Карцева, Ю.С.Колесов, А.В.Снопков, М.Д.Соловьёва, А.И.Телегин, Д.С.Тележкин, А.Н.Тихомиров, А.В.Федоров, Д.К.Федотов, В.В.Ястребов. Эксперименты по расширению функциональных возможностей мобильных сервисных роботов. «ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ РОБОТОТЕХНИКА», Сборник тезисов 34 -й Международной научно-технической конференции. – Санкт-Петербург: ЦНИИ РТК - ООО «Типография Фурсова», 2023. – 306 с.: ил., С.34-36, ISBN 978-5-6048032-9-5, https://er.rtc.ru/images/docs/2023/Sbornik-tezisov_ER-2023.pdf.

14. Pryanichnikov, V[alentin]; Kolesov, Y[uriy]; Tarasov, R[adomir] & Plotnikov, A[leksey] (2021). Integration Software for a Distributed Group of Mobile Service Robots, Proceedings of the 32nd DAAAM International Symposium, pp.0311-0315, B. Katalinic (Ed.), Published by DAAAM International, ISBN 978- 3-902734-33-4, ISSN 1726-9679, Vienna, Austria DOI: 10.2507/32nd.daaam.proceedings.045.

15. Васильев А. В, Лопота А. В. Уточнение типоразмерных групп наземных дистанционно управляемых машин для применения в опасных для человека условиях // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2015. № 1 (214). С. 226–234.

16. Голубев Ю.Ф., Пряничников В.Е., Павловский В.Е. Динамика шагающего робота, управляемого оператором. // В кн.: Исследование робототехнических систем. М.: Наука, 1982, с.78-86.,

17. Охоцимский Д.Е. Методика моделирования робота, перемещающегося в пространственной среде / Охоцимский Д.Е., Платонов А.К., Пряничников В.Е. //Изв. АН СССР, сер. Техническая кибернетика. -1980.- № 1. -С. 46-54.

18. Damic, V[jekoslav]; Cohodar, M[aida] & Muratovic, M[unir] (2017). Dynamic Modelling of Mobile Robots Based on its 3D CAD Model, Proceedings of the 28th DAAAM International Symposium, pp.0144-0149, B. Katalinic (Ed.), Published by DAAAM International, ISBN 978-3-902734-11-2, ISSN 1726-9679, Vienna, AustriaDOI: 10.2507/28th.daaam.proceedings.019.

19. Du, Y. (2016). Kinematics and Dynamic Modeling and Simulation Analysis of Three-wheeled Mobile Robot, International Conference on Mechanics Design, Manufacturing and Automation (MDM 2016) ISBN: 978-1-60595-354-0.

20. A.A. Hatab and R. Dhaouadi, «Dynamic modelling of differential-drive mobile robots using Lagrange and Newton-Euler methodologies: A unified framework», Adv. Robot. Autom., vol. 02, no. 02, 2013.

21. Механика промышленных роботов: учебное пособие для втузов: в 3 кн. / Под ред. К.В. Фролова и Е.И. Воробьева. Кн. 1: Кинематика и динамика / Е.И. Воробьев, С.А. Попов, Г.И.Шевелева. – М.: Высш. шк., 1988. – 304 с.

Информация об авторах

Пряничников Валентин Евгеньевич, д.т.н., в.н.с., Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук» (ИПМ им. М.В. Келдыша РАН), Россия, 125047, Москва, Миусская пл., д. 4; зав. кафедрой, профессор, ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», Россия, 127055, Москва, Вадковский пер., д. 3а, v.e.pr@yandex.ru, ORCID: 0000-0003-0974-317X

Плотников Алексей Викторович, м.н.с., ФИПМ им. М.В. Келдыша РАН, Россия, 125047, Москва, Миусская пл., д. 4, plotnikow.workmail@yandex.ru

Тележкин Дмитрий Сергеевич, аспирант, ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, Россия, 125047, Москва, Миусская пл., д. 4

Федотов Дмитрий Константинович, аспирант, ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, Россия, 125047, Москва, Миусская пл., д. 4

Колесов Юрий Сергеевич, аспирант, ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, Россия, 125047, Москва, Миусская пл., д. 4

Определение геометрических параметров препятствия на пути мобильного робота с использованием системы технического зрения

В.А. Кравчук✉, А.Е. Архипов
Государственный научный центр Российской Федерации «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики» (ГНЦ РФ ЦНИИ РТК), Санкт-Петербург, Россия, v.kravchuk@rtc.ru

Аннотация
В работе исследуется возможность оценки геометрических параметров препятствий с использованием нейронных сетей, позволяющий строить карту глубины по одному изображению. Представлен метод определения препятствий на изображении и расчета его высоты, глубины, угла поворота относительно фронтальной плоскости камеры. Проведена экспериментальная обработка результатов и оценка точности полученного алгоритма, подтверждающая его применимость для задачи определения геометрических параметров препятствий.

Ключевые слова
Нейронные сети, карта глубины, определение препятствий, определение размеров препятствий.

Благодарности
Результаты получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России №075-00697-24-00 от 27.12.2023 «Исследование методов создания самообучающихся систем видеонаблюдения и видеоаналитики на базе комплексирования технологий пространственно-временной фильтрации видеопотока и нейронных сетей» (FNRG 2022 0015 1021060307687-9-1.2.1).

Determination of geometric parameters of an obstacle in the path of a mobile robot using a vision system

Vladimir A. Kravchuk✉, Andey E. Arkhipov
Russian State scientific centre for robotics and technical cybernetics (RTC), St. Petersburg, Russia, v.kravchuk@rtc.ru

Abstract
The paper explores the possibility of estimating the geometric parameters of obstacles using neural networks, which allows you to build a depth map from a single image. A method for determining an obstacle in an image and calculating its height, depth, and angle of rotation relative to the front plane of the camera is presented. Experimental processing of the results and evaluation of the accuracy of the obtained algorithm were carried out, confirming its applicability to the problem of determining the geometric parameters of obstacles.

Key words
Neural networks, depth map, obstacle detection, obstacle sizing.

Acknowledgements
The work was carried out as the part of the state task of the Russian Ministry of Education and Science «Research of methods for creating self-learning video surveillance systems and video analytics based on the integration of technologies for spatiotemporal filtering of video stream and neural networks» (FNRG 2022 0015 1021060307687-9-1.2.1 №075-00697-24-00 from 27.12.2023).

Введение

При движении робота, перемещении в пункт назначения первоочередной задачей является определение препятствий. Зачастую, когда робот движется в автономном режиме или управляется оператором, не всегда можно определить по изображению с камеры является ли преграда преодолимой. Отсутствие возможности детектировать препятствие сильно усложняет процесс управления, в значительной степени снижает эффективность движения. В свою очередь быстрое и точное обнаружение препятствий позволят определить оптимальный маршрут, тем самым уменьшить время перемещений, сократить потребление ресурсов и устранить возможность столкновений. Однако, обнаружение препятствия является не единственной задачей для обеспечения безопасного движения робота. Важно также определить геометрические параметры преграды на пути робота, так как большинство объектов являются преодолимыми при известных значениях высоты, расстояния до робота и углу относительно его фронтальной плоскости. Неправильное восприятие препятствия может привести к усложнению маршрута, повреждению оборудования, травмам людей. На основании этих тезисов создание алгоритма обнаружение объектов и методов определения их геометрических размеров поможет

усовершенствовать существующие алгоритмы работы с препятствиями в системах технического зрения, повысит эффективность движения работа.

Для определения препятствия и его геометрических размеров используются карты глубины. Картами глубины называют изображения или их каналы, содержащие в себе информацию о расстоянии до поверхностей или объектов. Карты глубины могут представлять из себя как облако точек, так и изображение, дополняющееся данными о глубине для каждого пикселя на изображении. Основными способами построения таких карт являются: специальные RGB-D камеры, стереокамеры, нейронные сети (НС).

При использовании RGB-D камер построение карты осуществляется с помощью инфракрасных датчиков. В работе [1] подробно описали технологию RGB-D, а также устройство глубинных камер. Преимущества данных камер заключаются в высокой частоте кадров и автономности, получении информации не только о глубине, но и цвете, высокой точности получаемых данных глубины. Как отмечено в работе [2] результаты глубины с RGB-D камер содержат шум, из-за него части объектов становятся прерывистыми и одно препятствие может выглядеть как несколько разных. В связи с этим при обработке получаемых результатов приходится применять морфологические операции. Еще одним недостатком камер глубины, основанных на работе инфракрасных датчиков является то, что инфракрасное излучение солнца насыщает датчик и результаты измерений получаются недостоверными. Однако, одной из основных проблем является требовательность камер к текстуре сцены и окружающего пространства. RGB-D камеры хорошо работают с текстурированными поверхностями, но при получении результатов с гладких поверхностей, например, металлов, показания получаются некорректными.

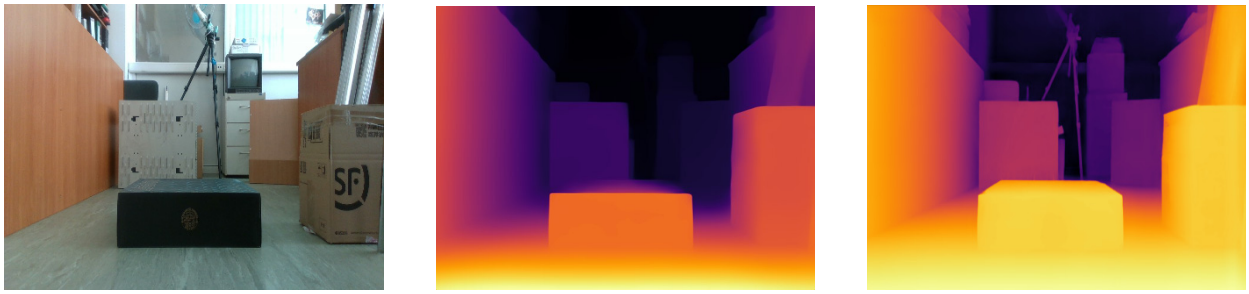
Идея использования стереокамер для построения карты глубины заключается в задействовании пары изображений одинаковой сцены, но с разных положений [3], подобно человеческому зрению. При известном расстоянии между двумя объективами, называемом стереобазой, два снимка сопоставляются. В дальнейшем происходит нахождение пикселей, принадлежащих одной и той же точке поверхности, и вычисляется диспаратность – разница в положении указанных ранее пикселей. Затем с помощью процесса триангуляции полученных данных и параметров камер вычисляются расстояния для карты глубины. В отличие от RGB-D камер, стереопара значительно лучше работает с гладкими и однотонными поверхностями. В работе [4] отмечено преимущество таких камер при работе в широком диапазоне сценариев освещения, по сравнению с технологией LIDAR, которая может испытывать трудности при прямом солнечном свете и в темноте. Стоит также отметить, что при использовании стереокамер не требуется задействовать лазеры или какие-либо активные излучения. Измерение расстояний стереокамерами возможно только при правильном соотношении между стереобазой и измеряемым расстоянием. Также на этапе триангуляции могут возникать проблемы определения пар точек в результате шумовых эффектов и сложности обработки теневых участков. Основным же недостатком стереокамер является их зависимость от размера стереобазы и неточность определения координат камер. Безусловно, данные координаты можно вычислить, однако, из-за вибрационных воздействий, математических неточностей и износа деталей робота погрешность при их определении значительно увеличивается. Ввиду этого для точного построения карты глубины стереокамерам необходима частая перекалибровка.

Третьим способом построения карты глубины является использование нейронных сетей. Важная задача, которую на данный момент пытаются решить с помощью НС — получение глубины сцены лишь с одного изображения. Данная задача является очень сложной ввиду отсутствия на изображении каких-либо данных кроме цвета. В работе [5] отмечается, что по причине зависимости преобразований из 2D изображений в 3D от проективных соотношений построение карты глубины на основании одного изображения невозможно без информации о внутренних параметрах камеры. Внутренние параметры камеры включают в себя фокусное расстояние, углы наклона пикселей и координаты центра оптической оси на изображении. В качестве решения описанной выше проблемы автор предложил для обучения модели создавать набор данных с изменяющимся фокусным расстоянием на основе известных данных с постоянным фокусным расстоянием. В работе [6] на место основных проблем автор ставит два фактора — это отсутствие универсального набора данных для обучения нейронных сетей и переобучение моделей. Автор также отмечает, что точность правильных результатов в некоторых моделях нейронных сетей составляет порядка 64,9%. Очевидным преимуществом НС по сравнению с другими технологиями является использование одного изображения. Такая система работы значительно снижает как материальную составляющую при построении карт глубины, так и обладает повышенной устойчивостью к шумам на изображении, в отличие от стереокамер.

Согласно результатам сравнений, проведенных в работе [7], нейронная сеть Depth Anything по всем показателям превосходит одну из популярных НС NDDepth [8] и другие модели. На данный момент существует два поколения нейронных сетей этого семейства. Для выбора способа построения карты глубины в ходе исследования было проведено сравнение результатов, получаемых выходных данных с обеих нейронных сетей. На рисунке 1а представлено изображение, переданное на вход НС, на рисунке 1б — визуализация результатов работы Depth Anything V1, на рисунке 1в — визуализация работы Depth Anything V2.

При анализе изображений на рисунках 1 б и 1 в видно, что качество визуализации и соответственно самой карты глубины в модели Depth Anything V2 значительно лучше, чем в модели первого поколения. Как отмечают сами авторы этих моделей в работе [9], новая версия НС обеспечивает гораздо более точные и надежные прогнозы глубины с помощью новых методов. Безусловно, все 3 предложенных для построения карт глубины метода являются достаточно эффективными. Однако, основная проблема RGB-D камер, как упоминалось

выше, заключается в плохой работе с гладкими поверхностями. Основные проблемы стереокамер заключаются в сильной зависимости от размера базы и необходимости в частой калибровке. Стоит отметить, что нейронные сети таких недостатков не имеют. Однако, в случае использования нейронных сетей, которые выдают метрические значения размеров, значительно снижается точность получаемых данных, ввиду отсутствия какой-либо информации о расстояниях до объектов. В связи с этим, для создания алгоритма определения геометрических параметров препятствий и построения карты глубины было принято решение использовать нейронную сеть Depth Anything V2, которая позволяет генерировать карту глубины в относительных значениях и является одной из самых точных на данный момент на наборе данных NYUv2 и KITTI.



(а) (б) (в)

Рисунок 1 — Сравнение карты глубины различных версий нейронной сети

Описание нейронной сети Depth Anything V2

Модель Depth Anything V2 обучена на 62 миллионах изображений в три этапа. Первый этап - обучение модели на основе DINOv2-G [10] и исключительно на синтетических изображениях, а не реальных данных с разметкой. В качестве обоснования такого выбора авторы модели называют два основных фактора. Во-первых, неизбежный шум на размеченных данных и неточности, вызванные ошибками датчиков или их особенностями, которые приводят к некорректной работе сети после обучения. Во-вторых, часто на представленных размеченных данных мелкие детали игнорируются, в результате чего снижается детализированность обученных моделей. Для устранения этих недостатков авторы приняли решение использовать синтетические изображения для обучения своих моделей. Второй этап - создание точной псевдоглубины на реальных изображениях без маркировки для того, чтобы устранить смещение распределения и отсутствие разнообразия в синтетических данных. Третий этап - обучение модели на псевдоразмеченных реальных изображениях для надежного обобщения.

В качестве декодера авторы модели Depth Anything V2 используют специальную архитектуру трансформера для предсказания карты глубины [11]. Все изображения обрабатываются с разрешением 518×518 пикселей путем изменения меньшего размера до 518 пикселей с последующим случайным обрезанием изображения.

Масштабирование карты глубины

Кадр с видеокамеры обрабатывается нейронной сетью Depth Anything V2 для построения карты глубины в относительных значениях, что не позволяет определять геометрические параметры препятствий. Поэтому одним из вариантов решения данной проблемы является масштабирование карты глубины с использованием априорной информации о расстоянии до какого-либо объекта. Данный подход не теряет в точности при получении карты глубины в сложных сценах, по сравнению с прямым использованием НС и выводом метрических значений в качестве выходных данных, при этом он не имеет недостатков, существующих в RGB-D камерах и стереозрении, в связи с чем и выбран для использования.

Для создания базы изображений и проверки работоспособности алгоритма была использована камера глубины RealSense D415. В качестве препятствий на изображениях использовалось 3 вида объектов, представленных на рисунке 3. Фиксация объектов производилась под различными углами и на различном расстоянии.

Для масштабирования карты глубины был реализован алгоритм, позволяющий оценивать погрешность получаемых результатов. На базе полученных изображений различных объектов были выделены 5 областей с различной глубиной (0,8; 0,87; 2,1; 2,4; 2,9 м), аналогично областям на рисунке 4а, а также построены три графика, представленные на рисунках 4б, 4в, 4г.

На диаграмме размаха на рисунке 4 представлена разница между значениями карты глубины Depth Anything V2 и карты глубины RealSense D415 в каждом пикселе выделенных областей. При анализе полученных результатов можно сделать вывод: с увеличением расстояния до выделенной области увеличивается погрешность получаемых данных и увеличивается разница между значениями внутри каждой области.

Для построения графика на рисунке 4б использовались 5 точек — средние значения карт глубины 5 выделенных областей. При проведении интерполяции установлено, что положения точек определяются согласно уравнению

$$y = kx + b \quad (1)$$

(а) (б) (в)

Рисунок 3 — Вариации объектов

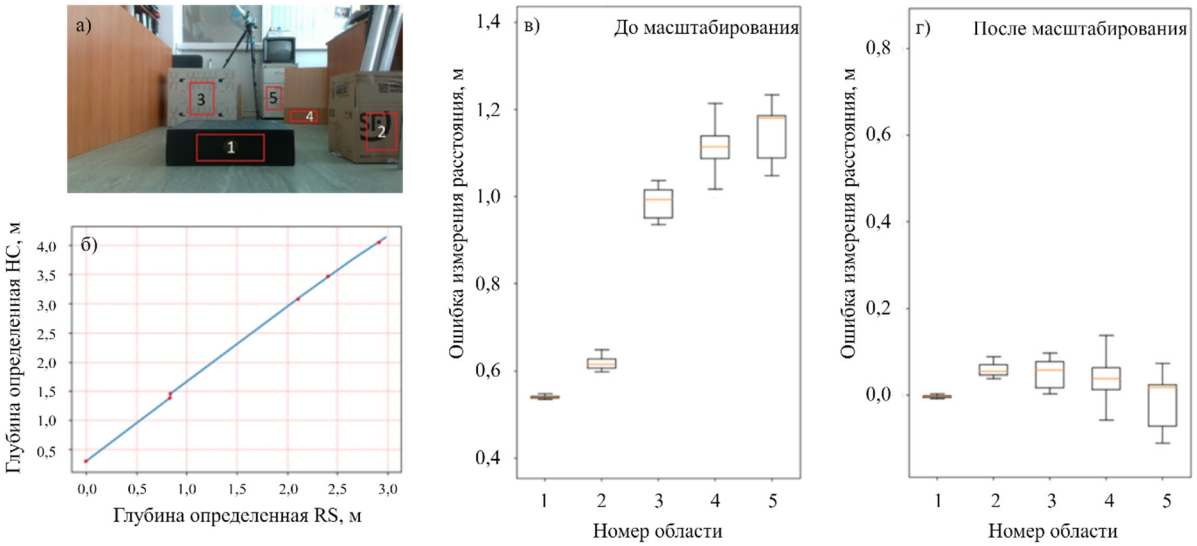


Рисунок 4 — Масштабирование карты глубины

На рисунке 4в представлен график, экстраполированный до пересечения с вертикальной осью, точка пересечения имеет координаты (0; 0,3). Такой же алгоритм был проделан с другими изображениями, их график так же имел вид линейной зависимости и пересекался с вертикальной осью в точке (0; 0,3), однако имел другой угол наклона. На основании этого можно сделать вывод, что коэффициент b в уравнении (1) не зависит от формы объекта и изображения, всегда приблизительно равен 0,3. Соответственно определить коэффициент k в уравнении масштабирования карты глубины Depth Anything можно при помощи одной точки, согласно формуле (1).

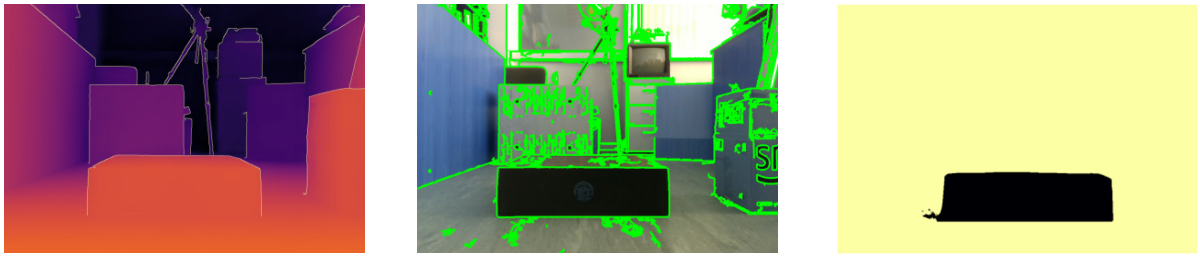
На рисунке 4 г представлена диаграмма, аналогичная диаграмме на рисунке 4 в, но с тем учетом, что вместо карты глубины Depth Anything V2 в относительных значениях, использовалась масштабированная карта глубины. Из анализа диаграммы следует, что погрешность средних значений в каждой области заметно снизилась, практически до 0, размах в каждой области остался практически неизменным. На выходе алгоритма масштабирования карты глубины Depth Anything представляет из себя матрицу, размер которой аналогичен размеру входного изображения, но значения равны расстоянию до каждого объекта, которому принадлежит пиксель.

Определения геометрических размеров преграды

Для определения высоты, глубины и угла поворота объекта первостепенно необходимо детектировать сам объект на изображении. Для выделения границ объектов к карте глубины применялся фильтр Canny [12]. Данный фильтр определяет границы объектов на основе градиента, поэтому с его помощью эффективно выделяются объекты, расположенные на различном расстоянии. На рисунке 5а представлены границы объектов, выделенные с помощью фильтра Canny, примененного к карте глубины.

На рисунке видно, что нижняя граница объекта-препятствия не определяется ввиду того, что расстояние до вертикальной плоскости объекта не значительно отличается от значений расстояния до пола в области объекта. Поэтому выделение границы объекта, соприкасающейся с близкой по удалению поверхностью, не происходит. Для решения данной проблемы поиск границ объектов производился и на исходном кадре. Из-за различия объектов и их удаленности на разное расстояние на изображении в месте их границ возникает сильный контраст интенсивности, поэтому с помощью упомянутого ранее фильтра Canny границы достаточно легко определяются. На рисунке 5б представлены результаты описанного алгоритма на полученном с камеры кадре. В случае, если полученные контуры имели пересечение с границами, обнаруженными на карте глубины, происходило объединение первых и вторых для получения замкнутой области. На основании этих результатов строилась бинарная маска объекта, представленная на рисунке 5в. Для определения высоты,

глубины и угла поворота объекта относительно фронтальной плоскости на бинарной маске выделялись вертикальная плоскость, которая параллельна фронтальной плоскости камеры, горизонтальная плоскость и вертикальная плоскость, которая расположена под углом к камере.



(а) **(б)** **(в)**

Рисунок 5 — Поиск краев объектов

Следующим этапом служило определение глубины объекта, для этого использовалась полученная ранее маска горизонтальной плоскости, входящая в маску объекта. С помощью нее определялись точки, наиболее удаленные друг от друга — разница в их удалении от объектива видеокамеры и определяла глубину объекта. Формирование изображения на матрице камеры обусловлено ходом луча в тонкой линзе. В связи с этим высоту объекта можно определить на основании геометрического подобия треугольников, следствием которого является формула (2)

$$Z = \frac{y \cdot Z'}{f}, \qquad (2)$$

где Z – искомая высота объекта; Z' – высота объекта в пикселях на изображении, находилась с помощью маски вертикальной плоскости, параллельной или расположенной под углом к фронтальной плоскости камеры, на которой определялось наибольшее число пикселей в одном столбце матрицы маски — оно и являлось искомым значением; f – фокусное расстояние камеры; y – расстояние от диафрагмы объектива до объекта, определялось, как среднее значение расстояния до объектов для каждого пикселя, который задавал пиксельную высоту.

Для нахождения угла поворота препятствия относительно фронтальной плоскости объектива использовалась маска вертикальной плоскости препятствия, расположенной под углом к плоскости объектива. На рисунке 7 представлено положение проекции указанной плоскости (Z) относительно камеры и ее отображения на матрице камеры (Z').

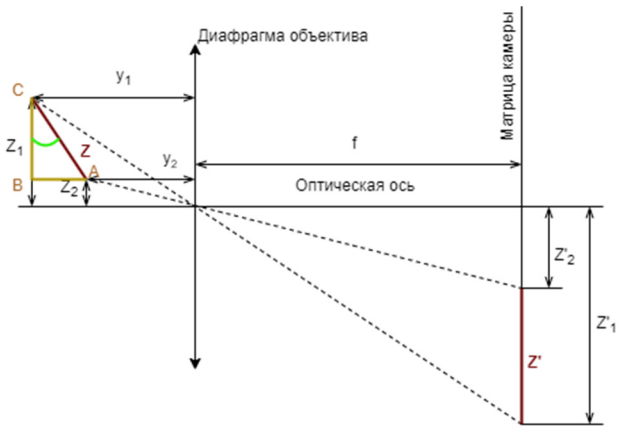


Рисунок 7 — Определение угла преграды по изображению

При известном центре оптической оси определяются значения Z_1' и Z_2' — положения крайних точек поверхности препятствия на матрице камеры. Расстояния от диафрагмы объектива до фактического положения этих точек (y_1 и y_2) находятся с помощью построенной ранее карты глубины. По формуле (3) аналогично определению высоты считаются значения Z_1 и Z_2 — расстояния от оптической оси камеры до фактического положения точек. В результате образуется прямоугольный ΔABC с двумя известными сторонами ($AB = y_1 - y_2$и $BC = Z_1 - Z_2$), по которым и можно найти искомый угол ($\angle ACB = arctg\frac{AB}{BC}$). Стоит отметить, что при изменении положения объекта усложняется лишь корректное определение стороны BC представленного треугольника: если объект не пересекает оптическую ось, то указанная сторона представляет из себя разность значений Z_1' и Z_2', в случае пересечения — сумму.

Экспериментальное исследование алгоритма

Для оценки результатов определения высоты проведены сравнения данных, полученных двумя способами: вручную, путем самостоятельного подсчета пикселей, которые определяют высоту объекта и расчета фактической высоты на основании априорной информации о расстоянии; путем использования предложенного в статье алгоритма, позволяющего в автоматическом режиме определить объект, его пиксельную высоту и рассчитать фактическую высоту на основании данных с карты глубины. В таблице 1 представлены результаты сравнения этих способов с оценкой относительной погрешности, названия объектов соответствуют представленным на рисунке 3 видам преград.

Таблица 1 — Оценка расчета высоты

Описание объекта	Расстояние до объекта, м	Реальная высота, см	Определенная высота, см	Относительная погрешность определенной высоты
Объект А	0,830	12,5	12,32	1,44%
Объект А, под углом	0,913	12,5	16,06	28,48%
Объект А	1,369	12,5	12,81	2,48%
Объект Б	0,785	49,5	49,65	0,30%
Объект Б, под углом	0,924	49,5	48,30	2,42%
Объект Б	1,272	49,5	48,00	3,03%
Объект Б	2,107	49,5	45,30	8,48%
Объект Б, под углом	2,138	49,5	44,90	9,29%
Объект В	0,740	17,1	17,70	3,51%
Объект В	1,074	17,1	18,10	5,85%

При анализе таблицы заметно, что в опыте № 2 наблюдается достаточно высокая погрешность результата предложенного алгоритма. Данная ошибка вызвана некорректным выделением контура препятствия, ввиду выделения части поверхности пола при определении маски объекта. В остальных случаях значительных ошибок или больших погрешностей у предложенного алгоритма не заметно. Его погрешность при определении высоты практически во всех случаях меньше 10%.

Аналогичная оценка проводилась и при сравнении результатов по определению угла, под котором расположен объект по отношению к камере. В дополнение, использовался способ, основанный на карте глубины камеры RealSense D415 (RS). С карты глубины этой камеры также использовались расстояния до двух точек объекта. Третий способ – предложенный ранее алгоритм. В таблице 2 представлены результаты сравнения этих способов.

Таблица 2 — Оценка расчета угла поворота препятствия

Описание объекта	Расстояние до объекта, м	Реальный угол, °	Угол RS, °	Абсолютная погрешность RS	Определенный угол, °	Абсолютная погрешность определенного угла
Объект А	0,830	0	1,7	1,7	0	0
Объект А, под углом	0,913	22,0	27,7	5,7	29,20	7,20
Объект А	1,369	0	8,5	8,5	0	0
Объект Б	0,785	0	0,3	0,3	4,35	4,35
Объект Б, под углом	0,924	44,1	48,7	4,6	45,90	1,80
Объект Б	1,272	0	3,9	3,9	0,39	0,39
Объект Б	2,107	0	2,9	2,9	0	0
Объект Б, под углом	2,138	46,8	54	7,2	34,19	12,61
Объект В	0,740	1,4	2,3	0,9	0,47	0,93
Объект В	1,074	1,6	2,6	1	0	1,60

При анализе таблицы заметно, что в опыте №8 (Объект Б, под углом) наблюдается превышенная погрешность определения угла с помощью предложенного алгоритма, это связано с тем, что на достаточно большом расстоянии размах значений расстояния на карте глубины, построенной нейронной сетью, между соседними пикселями заметно увеличивается и маска боковой поверхности объекта выделяется не совсем корректно. Стоит заметить, что в остальных случаях результаты предложенного алгоритма достаточно неплохи, погрешность полученных результатов незначительна, а в некоторых случаях даже точнее карты глубины камеры RealSense D415.

Заключение

В работе представлен алгоритм определения геометрических параметров препятствия по изображению и карте глубины, полученной с использованием нейронной сети. В качестве модели для построения относительной карты глубины была выбрана нейронная сеть DepthAnything V2, такой выбор был обусловлен ее высокими показателями точности. В ходе выполнения работы выявлено, что использование априорной информации о расстоянии до объектов, позволяет повысить качество получаемой карты глубины. Для определения маски объекта, разделения его на плоскости и определения размеров объекта использовались алгоритмы классического технического зрения. Оценка отклонений полученных результатов от истинных значений позволила понять, что при удалении объекта на расстояние не более 1.4 – 1.5 м можно получить достаточно точные значения искомой высоты с относительной погрешностью не более 3%. При большем удалении объекта погрешность увеличивается до 10%, такой результат достаточен для решения некоторого круга задач. Аналогичная ситуация наблюдается при определении угла поворота препятствия относительно фронтальной плоскости камеры.

Литература

1. Kyriaki A. Tychola, Ioannis Tsimperidis и George A. Papakostas. On 3D Reconstruction Using RGB-D Cameras // Digital. – 2022 – С. 401– 423. doi: 10.3390/digital2030022.

2. Arindam Saha et. al. Efficient Obstacle Detection and Tracking Using RGB-D Sensor Data in Dynamic Environments for Robotic Applications // Sensors. – 2022 – С. 6537 – 6568. doi: 10.3390/s22176537.

3. Варлашин В.В. Методика построения карты глубины по изображениям пары ортогонально ориентированных камер со сверхширокоугольными объективами // Робототехника и техническая кибернетика. – 2022. – Т. 10, № 3. – С. 236-240. doi: 10.31776/RTCJ.10309.

4. Stereo Vision in ADAS: Pioneering Depth Perception Beyond LiDAR [Электронный ресурс]. URL: https://learnopencv.com/adas-stereo-vision/ (дата обращения: 01.08.2024).

5. Lei He, Guanghui Wang, Zhanyi Hu. Learning Depth From Single Images With Deep Neural Network Embedding Focal Length // IEEE Transactions on Image Processing. – 2018 – С. 4676 – 4689. doi: 10.1109/TIP.2018.2832296.

6. Михальченко Д.И., Ивин А.Г., Сивченко О.Ю., Аксаментов Е.А. Применение глубоких нейронных сетей в задаче получения карты глубины из двумерного изображения // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2019. – С.113-134. doi: https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-3-113-134.

7. Lihe Yang et. al. Depth Anything: Unleashing the Power of Large-Scale Unlabeled Data // Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) – 2024 – С. 10371 – 10381. doi: 10.48550/arXiv.2401.10891.

8. Shuwei Shao et. al. NDDepth: Normal-Distance Assisted Monocular Depth Estimation // International Conference on Computer Vision (ICCV) – 2023 – С. 7931 – 7940. doi: 10.1109/ICCV51070.2023.00729.

9. Lihe Yang et. al. Depth Anything V2 [Электронный ресурс]. – 2024. URL: http://arxiv.org/abs/2406.09414 (дата обращения: 01.08.2024).

10. Maxime Oquab et. al. DINOv2: Learning Robust Visual Features without Supervision [Электронный ресурс]. – 2024. URL: http://arxiv.org/abs/2304.07193 (дата обращения: 01.08.2024).

11. Rene Ranftl, Alexey Bochkovskiy, Vladlen Koltun. Vision Transformers for Dense Prediction // International Conference on Computer Vision (ICCV). – 2021 – С. 12179 – 12180. doi: 10.1109/ICCV48922.2021.01196.

12. Canny J. A computational approach to edge detection //IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence. – 1986. – №. 6. – С. 679-698. doi: 10.1109/TPAMI.1986.4767851.

Информация об авторах

Кравчук Владимир Алексеевич, техник, Государственный научный центр Российской Федерации «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики» (ГНЦ РФ ЦНИИ РТК), Россия, 194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 21, v.kravchuk@rtc.ru

Архипов Андрей Евгеньевич, м.н.с., ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Россия, 194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 21, a.arkhipov@rtc.ru

Мехатронные привода в тормозной и рулевой системах электротранспорта

М.А. Малкин, А.С. Переладов, А.М. Щербин✉
Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт «НАМИ» (ФГУП «НАМИ»), Москва, Россия, aleksey.scherbin@nami.ru

Аннотация
Интенсивное развитие электрических транспортных средств в современном мире ставит задачи по созданию новых составных частей таких транспортных средств. Ужесточаются требования к электрическому транспортному средству в целом и к приводам рулевой и тормозной систем управления. Данная задача может быть решена с помощью приводов на основе современных электромеханических преобразователей. Современные электромеханические преобразователи на основе многополюсного синхронного электродвигателя с постоянными магнитами весьма эффективны. Приводы, построенные на их основе, имеют высокое быстродействие и компактные размеры. В настоящее время является актуальной задача разработка электромеханического преобразователя для поворота управляемых колес и привода рабочего тормоза.

Ключевые слова
Мехатронный привод, электромеханический преобразователь, рулевая система, тормозная система.

Mechatronic drives in the braking and steering systems of electric vehicles

Maxim A. Malkin, Alexey S. Pereladov, Alexey M. Shcherbin✉
Federal State Unitary Enterprise «Central Order of the Red Banner of Labour Scientific Research Automobile and Automotive Engines Institute «NAMI» (FSUE «NAMI»), Moscow, Russia, aleksey.scherbin@nami.ru

Abstract
The intensive development of electric vehicles in the modern world sets the tasks to create new components of such vehicles. The requirements for the electric vehicle as a whole and to drives of the steering and brake control systems are tightened. This problem can be solved using drives based on modern electromechanical converters. Modern electromechanical converters based on a multi-polar synchronous electric motor with constant magnets are very effective. The drives built on their basis have high speed and compact dimensions. Currently, the task is to develop an electromechanical converter for the rotation of controlled wheels and the drive brake drive.

Key words
Mechatronic drive, electromechanical converter, steering system, braking system.

Введение

Интенсивное развитие электрических транспортных средств в современном мире предъявляет новые, повышенные требования к электрическим транспортным средствам.

В Концепции по развитию производства и использования электрического автомобильного транспорта Российской Федерации на период до 2030 года [1], в числе прочего, ставится задача повышения энергоэффективности и безопасности электротранспорта. Повышаются соответствующие требования к электрическому транспортному средству в целом, и к его составным частям.

Следуя цели повышения экологичности автомобилей Европейская комиссия установила срок после которого купить машину с ДВС станет невозможным - 2035 год [2].

И большинство ведущих производителей автомобилей уже запланировали прекращение выпуска автомобилей с ДВС в течении ближайших 10-20 лет и замену их на электромобили [3].

Этому переходу способствуют современные достижения в создании тяговых электроприводов. Особенно важен тот факт, что новые тяговые электроприводы весьма энергоэффективны [4] и массово используются в транспортных средствах с электрической трансмиссией, а разработка закона управления тяговыми электроприводами является важной научной задачей [5].

Сейчас в мире выпускаются десятки моделей транспортных средств, которые используют накопитель электрической энергии и тяговый электропривод. Чаще всего в электромобилях используются аккумуляторы в качестве накопителя электроэнергии. А самый распространенный тип аккумуляторов — это аккумуляторы на основе соединений лития. Ведутся работы по увеличению их емкости, скорости зарядки и сроку службы. Также активно ведутся работы по другим типам источников электроэнергии: топливным элементам, солнечным элементам и другим [6].

Очевидно, что самой энергоемкой системой электромобилей является тяговая система и ее небольшие улучшения могут сэкономить много энергии. Но, целесообразно, для достижения обозначенных целей, заниматься всеми системами электромобиля в комплексе. И в этой связи мы сосредоточились на двух основных системах управления движением электрического транспортного средства: рулевая и тормозная системы.

В силу традиций проектирования, в современных электрических транспортных средства остаются некие артефакты от транспортных средств с традиционным ДВС: это приводы, которые ранее получали энергию от ДВС: компрессоры, насосы, вентиляторы и т.п. Так, например, в городском электробусе осталась пневматическая тормозная система [7], и для обеспечения работы пневматической тормозной системы установлен компрессор с питанием от тяговых аккумуляторов.

Поэтому, одним из способов повышения энергоэффективности и безопасности может быть использование в системах управления движением современных мехатронных приводов, которые используют запасенную на борту транспортного средства электрическую энергию напрямую, без преобразования в другие виды энергии.

В качестве факта, подтверждающего правильность такого принципа из недавнего прошлого можно сказать о техническом решении, которое было предложено в сфере самолетостроения. В 1977 году американским исследователем С. Хэлсли [8] была предложена концепция «полностью электрифицированного самолета» в котором должен использоваться только один вид вспомогательной энергии - электрической.

В рамках защиты этой концепции было подтверждено, что создание единой вторичной системы электропитания повышают летно-технические характеристики самолета, снижают его массу, улучшают режимы работы силовой установки, уменьшают расход топлива и т.д. Отечественные разработчики также работают в данном направлении с 80-х годов и используют похожий принцип «самолет с полностью электрифицированным оборудованием».

Современные мехатронные приводы, например, на основе многополюсного синхронного электродвигателя с постоянными магнитами, весьма эффективны. Такие приводы имеют высокое быстродействие и компактные размеры. Частотные преобразователи для управления такими приводами используют современные, производительные, специализированные микроконтроллеры, которые позволяют реализовывать адаптивные алгоритмы управления. Очевидно, что использование таких электроприводов в тормозной и рулевой системах повышают не только энергоэффективность, но и безопасность транспортного средства.

Рулевая система

И есть известные производители, которые весьма активно двигаются в обозначенном направлении. Так, в некоторых современных электрических транспортных средствах уже применяются электроприводы поворота управляемых колес и электроприводы стояночного тормоза. На рисунке 1 показана конструкция рулевого управления электромобиля Lexus RZ 450e, выпускаемого серийно с апреля 2022 года компанией Lexus, подразделением компании Toyota [9]. Рулевое управление выполнено по технологии «steer-by-wire» («управление по проводам»). В данном примере весьма важным является тот факт, что впервые на серийном гражданском электромобиле полностью отсутствует механическая связь между рулевым колесом и управляемыми колесами.

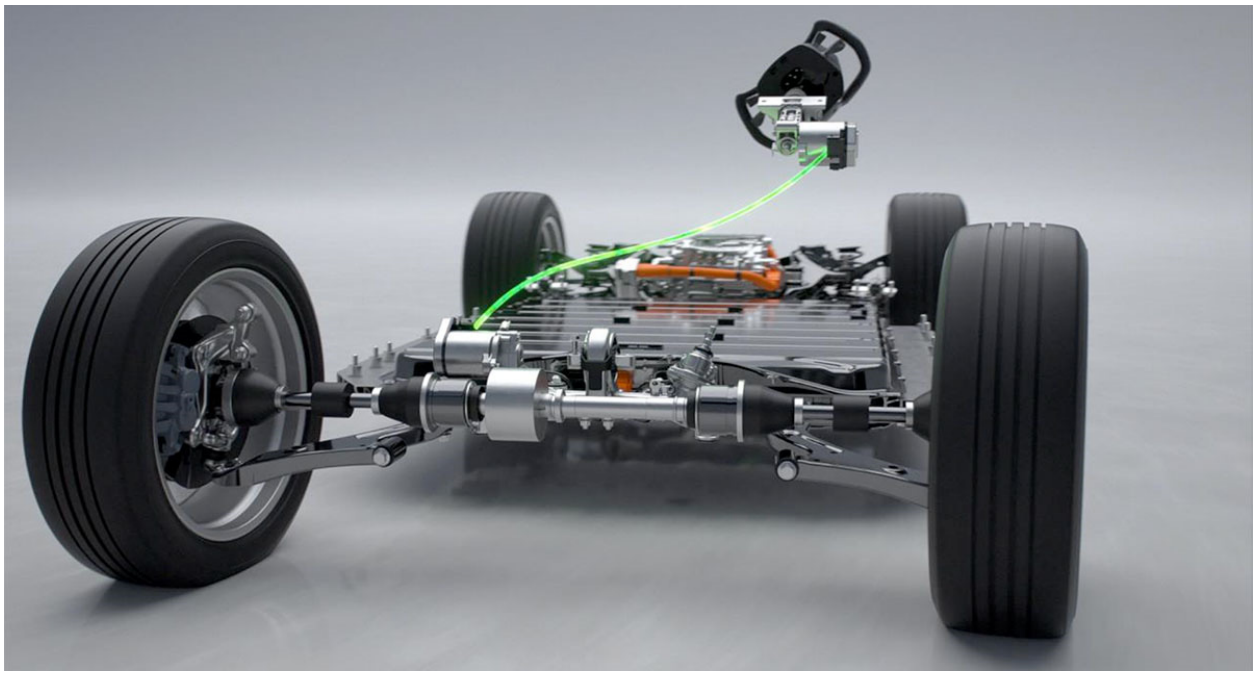


Рисунок 1 — Рулевое управление электромобиля Lexus RZ 450e

Электропривод поворота управляемых колес повышает энергоэффективность электромобиля за счет (как уже сказано ранее) исключения двойного преобразования энергии, в отличии от гидропривода. А также за счет уменьшения количества шарниров и это особенно важно в многоосных транспортных средствах [10].

С точки зрения повышения безопасности, такой электропривод дает более высокое быстродействие, возможность реализации гибких, адаптивных алгоритмов управления и за счет возможности игнорирования ошибочных действий водителя. Также важно отметить, что использование принципа «управления по проводам» дает конструктору более широкие возможности по компоновке составных частей транспортного средства.

Приведенные выше возможность и преимущества, которые дает мехатронный привод были по достоинству оценены в ФГУП «НАМИ» и в рамках выполнения одной из работ, по созданию электрического транспортного средства, был разработан привод, показанный на рисунке 2. Это преобразователь на основе многополюсного синхронного электродвигателя с постоянными магнитами, шарико-винтовой передачи и силового блока управления для поворота управляемых колес. Привод развивает усилие 11 кН, при скорости перемещения 50 мм/с. Масса привода составляет 12 кг. Резервирование привода осуществляется с помощью двух независимых обмоток электродвигателя.

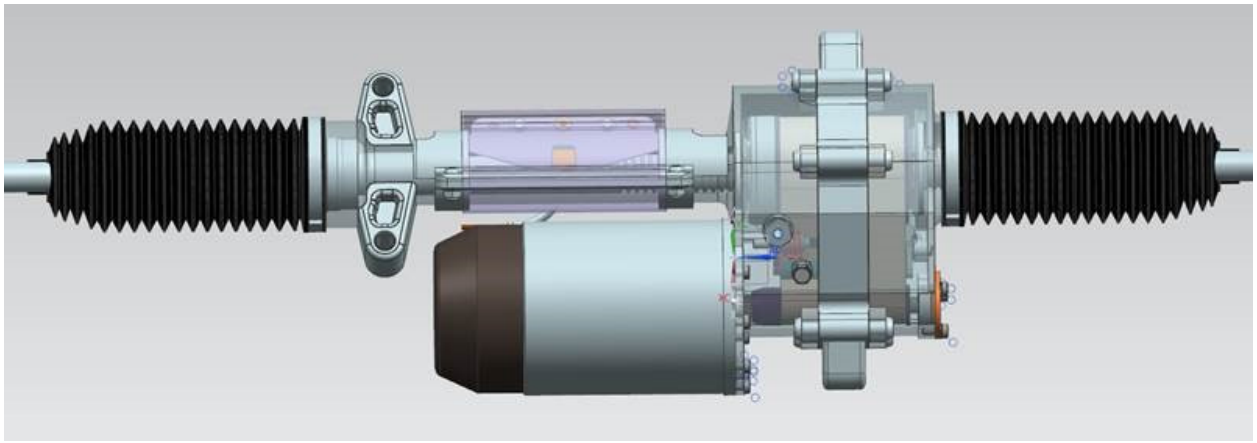


Рисунок 2 — Мехатронный привод поворота управляемых колес

Тормозная система

Перейдем к тормозной системы, применение в которой мехатронного привода также имеет ряд преимуществ. Мехатронный привод, совместно с блоками управления тормозной системы может выполнять ряд функции, таких как ABS, EBD, ESP, ASR и другие. По сравнению с гидравлическими системами, мехатронный привод работает без отдачи на педаль тормоза, имеет меньшее количество составляющих тормозной системы и более экологичен, ввиду отсутствия в системе тормозной жидкости.

Важно отметить, что за последние 30 лет ведущие мировые производители (Bosch, ContinentalTeves, Siemens, Delphi, Hyundai, Mando, TWR и др.) получили множество патентов на конструкции электромеханических тормозных механизмов [11]. Однако, хотя эти производители работают длительное время над конструкцией мехатронного тормозного механизма, ни у одного из них нет продукта, который в настоящее время готов к выходу на рынок. К основным препятствиям, предположительно, относятся ограничения по финансовым затратам на внедрение новых приводов в серийное производство, а также требования различных нормативов и стандартов по безопасности.

Например, известна конструкция [12], которая содержит электродвигатель и ролико-винтовую передачу. Данный привод реализует прямое воздействие на тормозные колодки, хотя есть конструкции, имеющие промежуточный редуктор.

По мнению Siemens электрические тормозные механизмы высвобождают примерно 22 литра в моторном отсеке для оптимизации компоновки.

Динамика срабатывания электромеханического привода рабочего тормоза выше чем у электрогидравлического и гидромеханического [13] на 22% и 61% соответственно. Это, в итоге, позволяет более точно дозировать тормозное усилие на колесах и сокращает тормозной путь транспортного средства, повышая его безопасность.

На рисунке 3 представлен внешний вид по 3D модели разработанного в ФГУП «НАМИ» мехатронного электрогидравличекого привода рабочего тормоза электрического транспортного средства. В силу ряда конструктивных причин был выбран электрогидравлический вариант для первой реализации. Одновременно ведется разработка электромеханического варианта с непосредственной установкой на тормозном механизме.

Данный привод развивает усилие 7 кН при скорости 50 мм/с. Масса привода составляет 10 кг.

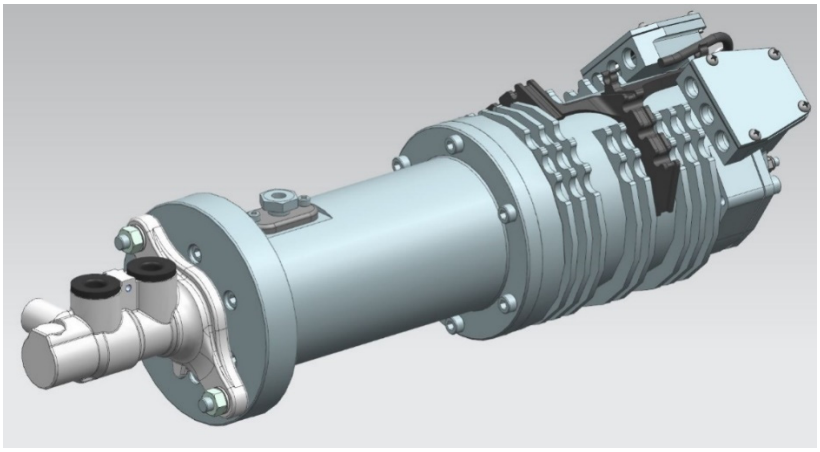


Рисунок 3 — Конструкция электрогидравлического привода тормоза

Заключение

В заключении необходимо отметить, что использование мехатронных приводов в электрических транспортных средствах обусловлено повышением требований к энергоэффективности и безопасности. Преимущества, которые дает использование мехатронных приводов в тормозной и рулевой системах электрического транспортного средства, в основном, следующие:

- повышение энергоэффективности электрического транспортного средства за счет исключения преобразования энергии и более высокого КПД в широком температурном диапазоне;
- повышение безопасности транспортного средства за счет высокого быстродействия, точности и реализации адаптивных алгоритмов;
- конструктивные преимущества: компактность, меньший вес;
- повышенный срок службы привода без технического обслуживания.

Литература

1. Концепция по развитию производства и использования электрического автомобильного транспорта в Российской Федерации на период до 2030 года Распоряжение от 23 августа 2021 года №2290-р. // Правительство России. Документы: [сайт]. - 2021. - URL: http://government.ru/docs/43060/ (дата обращения 28.10.2024).
2. Евросоюз решил, когда запретит продавать автомобили с ДВС // Российская газета. Автопарк: [сайт]. - 2021. - URL: https://rg.ru/2021/07/15/evrosoiuz-reshil-kogda-zapretit-prodavat-avtomobili-s-dvs.html (дата обращения 28.10.2024).
3. Мировые тенденции автомобильной отрасли в 2022 году // Ассоциация «Российские автомобильные дилеры»: [сайт]. - 2022. - URL: https://www.asroad.org/mirovye-tendentsii-avtomobilnoj-otrasli-v-2022-godu/ (дата обращения 18.01.2024).
4. Анучин, А. С. Разработка цифровых систем эффективного управления комплектов тягового электрооборудования гибридных электрических транспортных средств: специальность 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы»": диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Анучин Алексей Сергеевич, 2018. – 445 с. – EDN ZEHFFK.
5. Котиев, Г. О. Прогнозирование подвижности специальных колесных шасси на стадии проектирования / Г. О. Котиев, Б. В. Падалкин // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2013. – № 3(15). – С. 29. – EDN RCSAOD.
6. Сафиуллин, Р. Н. Эффективность систем тягового электропривода электромобилей и гибридных транспортных средств / Р. Н. Сафиуллин, Р. Р. Сафиуллин. – Москва-Берлин: Директ-Медиа, 2021. – 365 с. – ISBN 978-5-4499-1770-6. – DOI 10.23681/612418. – EDN KXUIGD.
7. КамАЗ-6282 // ВикипедиЯ Свободная энциклопедия: [сайт]. – 2024. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/КамАЗ-6282 (дата обращения 28.10.2024).
8. Helsley S.W. Power-by-Wire for aircraft the all electric airplane // S.W. Helsley SAE PREPRINT, № 771006, 1977.
9. DRIVING THE 2023 LEXUS RZ 450E [Электронный ресурс] // LEXUS ENTHUSIAST [2022]. URL: https://lexusenthusiast.com/2022/05/02/driving-the-2023-lexus-rz-450e/ (дата обращения 14.01.2024).
10. Белоусов, Б. Н. Энергоэффективность рулевого привода многоосной машины / Б. Н. Белоусов, А. М. Щербин // Автомобильная промышленность. – 2022. – № 11. – С. 22-25. – EDN YBFHYB.
11. A Review of Electro-Mechanical Brake (EMB) System: Structure, Control and Application / C. Li, G. Zhuo, Ch. Tang [et al.] // Sustainability. – 2023. – Vol. 15, No. 5. – P. 4514. – DOI 10.3390/su15054514. – EDN EKYWLQ.

12. Электромеханические тормозные системы // Журнал Устройство: [сайт] – 2024. – URL: https://ustroistvo-avtomobilya.ru/tormoznaya-sistema/e-lektromehanicheskie-tormozny-e-sistemy/ (дата обращения 28.10.2024).

13. Тутубалин, Р. Ю. Математическое моделирование динамики электромеханического тормозного привода / Р. Ю. Тутубалин, В. Н. Филимонов // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 3. – С. 23. – EDN RPOINR.

Информация об авторах

Малкин Максим Алексеевич, к.т.н., начальник управления, Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт «НАМИ» (ФГУП «НАМИ»), Россия, 125438, Москва, ул. Автомоторная, д. 2, maksim.malkin@nami.ru

Переладов Алексей Сергеевич, к.т.н., начальник управления, ФГУП «НАМИ», Россия, 125438, Москва, ул. Автомоторная, д. 2, a.pereladov@nami.ru

Щербин Алексей Михайлович, к.т.н., начальник отдела, ФГУП «НАМИ», Россия, 125438, Москва, ул. Автомоторная, д. 2, alexey.scherbin@nami.ru

Контроль эффективности и надежности системы комплексной безопасности для обеспечения защищенности доверенных иммерсивных интерфейсов взаимодействия робота и оператора

В.А. Саяркин, В.Р. Виноградов, И.Б. Паращук✉
Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования «Военная орденов Жукова и Ленина Краснознаменная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного» Министерства обороны Российской Федерации (Военная академия связи), Санкт-Петербург, Россия, shchuk@ramdler.ru

Аннотация
Рассмотрены актуальность, предпосылки и условия реализации модели и методики контроля эффективности и технической надежности системы комплексной безопасности для обеспечения защищенности современных доверенных иммерсивных интерфейсов взаимодействия робота и оператора. Предложены стадии реализации модели и методики контроля, причем на стадии моделирования процесса защиты информации при обмене данными в рамках интерфейса такого класса использовано статистическое распределение Вейбулла. В рамках практического применения это позволит учесть неоднородность процедур в границах данного процесса и оценить вероятность отказа конструктивных элементов системы комплексной безопасности доверенных иммерсивных интерфейсов взаимодействия робота и оператора с течением времени.

Ключевые слова
Робот, оператор, модель, методика, комплексная безопасность, доверенный иммерсивный интерфейс, взаимодействие, контроль, эффективность, надежность.

Control of the effectiveness and reliability of an integrated safety system to ensure the security of trusted immersive interfaces between the robot and the operator

Vitaly A. Sayarkin, Vladislav R. Vinogradov, Igor B. Parashchuk✉
Federal State Treasury Military Educational Institution of Higher Education «Military Orders of Zhukov and Lenin Red Banner Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union C.M. Budyonny» of the Ministry of Defense of the Russian Federation (Military Academy of Communications), St. Petersburg, Russia, shchuk@ramdler.ru

Abstract
The article considers the relevance, prerequisites and conditions for implementing the model and methodology for monitoring the efficiency and technical reliability of an integrated security system to ensure the security of modern trusted immersive interfaces for interaction between a robot and an operator. The stages of implementing the model and methodology for monitoring are proposed, and at the stage of modeling the process of protecting information during data exchange within the interface of this class, the Weibull statistical distribution is used. In the context of practical application, this will allow taking into account the heterogeneity of procedures within the boundaries of this process and assessing the probability of failure of structural elements of the integrated security system of trusted immersive interfaces for interaction between a robot and an operator over time.

Key words
Robot, operator, model, methodology, integrated security, trusted immersive interface, interaction, control, efficiency, reliability.

На современном этапе развития экстремальной робототехники важное внимание уделяется созданию и совершенствованию доверенных иммерсивных интерфейсов взаимодействия робота и оператора. Это, наряду с интеллектуальными адаптивными интерфейсами, один из инновационных и бурно развивающихся (также с привлечением элементов искусственного интеллекта), программно-аппаратных механизмов устойчивого, непрерывного, оперативного и безопасного управления современными специальными и промышленными робототехническими системами, привлекаемыми для работы в экстремальных средах и опасных для человека условиях эксплуатации [1-3].

Интерфейсы взаимодействия робота и оператора в традиционном, классическом понимании, представляют собой совокупность средств, методов и правил для взаимосвязи и осуществления коммуникаций между объектом и субъектом управления. В отличие от системных интерфейсов, являющихся совокупностью унифицированных (в идеале – стандартизованных) программных и аппаратных средств, выполняющих функции взаимодействия функциональных элементов роботизированных объектов – специальных и промышленных

робототехнических систем (СПРТС), и нацеленных на поддержание информационной, электрической и конструктивной совместимости подобных элементов, рассматриваемые нами, так называемые, защищенные пользовательские интерфейсы, отвечают за оперативное и безопасное взаимодействие человека-оператора со всевозможными элементами (устройствами) и программными модулями СПРТС [4-7].

При этом иммерсивный пользовательский интерфейс (Trusted UI) позволяет расширить и углубить диапазон восприятия оператором состояния робота, состояния среды и итогов введения управляющих воздействий, создавая у оператора эффект «присутствия», эффект погружения в искусственно созданную среду взаимодействия.

Это специальный «погружающий» интерфейс, который с помощью программно-аппаратных средств образовывает виртуальную интерактивную оболочку (среду), связывающую робота с оператора, создавая у последнего «иллюзию реальности». С помощью иммерсивного пользовательского интерфейса оператор погружается в машинно-генерируемую трехмерную среду, формируемую технологиями виртуальной реальности и отображающую некоторый искусственный мир, деятельность в котором ведет к решению профессиональных задач управления роботом в действительном мире. [8-11].

Вместе с тем, новый набор достоинств иммерсивных пользовательских интерфейсов (ИПИ) не отменяет, а делает еще более значимой задачу обеспечения требований по их защищенности, поскольку новые, иммерсивные свойства программного сокета либо программно-аппаратного коммуникационного канала взаимодействия робота и оператора, особенно для экстремальных условий эксплуатации, предопределяют новые угрозы нарушения конфиденциальности, целостности и доступности данных, передаваемых по виртуальным каналам интерфейсов такого класса.

Обеспечение обмена данными посредством ИПИ между оператором и элементами (процессами) робота в условиях агрессивной окружающей среды, в том числе, в условиях противодействия со стороны реальных и потенциальных нарушителей, подвержено широкому спектру уязвимостей, сосуществует с большим числом угроз, что предопределяет объективную необходимость формулировки и решения задач контроля эффективности и надежности системы защиты информации в интересах обеспечения безопасности ИПИ взаимодействия робота и оператора, необходимость построения гарантированно безопасных, так называемых, доверенных интерфейсов [7, 12].

Концепция доверенности процесса загрузки операционных систем, доверенности сред, платформ, программ, средств и интерфейсов взаимодействия подразумевает разработку и построение гарантированно безопасных как человеко-машинных, так и сугубо технических объектов и процессов такого класса [13-19].

В этом же ряду стоит и актуальная задача разработки и построения доверенных ИПИ (ДИПИ) взаимодействия робота и оператора. Анализ ключевых современных положений концепции доверенности в IT-отрасли позволяет говорить о ДИПИ, как о защищенной целостной системе, использующей аппаратные и программные средства для обеспечения одновременной обработки и обмена данными различного уровня конфиденциальности между роботом и оператором (группой операторов) без нарушения прав доступа к каналу управления этим роботом [15].

Таким образом, под ДИПИ следует понимать взаимоувязанную совокупность технических и программных средств, обеспечивающих создание, применение и развитие безопасных средств и процедур взаимодействия робота и оператора, осуществление процессов управления роботом в соответствии с его предназначением, причем, управления, основанного на гарантированно защищенном обмене данными между роботом и оператором.

С юридической точки зрения, помимо того, что ДИПИ фактически обуславливается частной и совокупной доверенностью используемых программ и аппаратно-программных средств, доверенность данного объекта подразумевает, что ДИПИ обладает полным комплект программной, конструкторской и эксплуатационной документации, включая исходные листинги (коды) программ, отвечающих необходимым требованиям защищенности интерфейсов такого класса. В идеале, программное обеспечение и аппаратно-программные средства ДИПИ взаимодействия робота и оператора должны обладать подтвержденными лицензиями (сертификатами соответствия).

По физической сущности и с точки зрения информационной неуязвимости, ДИПИ – интерфейс взаимодействия робота и оператора, основанный на реализации для его защиты надежной системы комплексной безопасности (СКБ), причем степень убежденности создателей ДИПИ и операторов роботов в том, что подобные интерфейсы способны отвечать требованиям по гарантированному обеспечению защищенности, в большинстве случаев определяется «доверенностью» к применяемым при их разработке и создании программно-аппаратным средствам.

Важным условием при разработке и создании СКБ ДИПИ взаимодействия робота и оператора, одним из ключевых этапов совершенствования объектов такого класса, являются, на наш взгляд, применение современных методологических и практических подходов к оперативному и достоверному контролю их эффективности и надежности.

Оперативный и достоверный контроль эффективности и надежности СКБ для обеспечения защищенности ДИПИ взаимодействия робота и оператора не только способствует формированию целесообразной (рациональной) архитектуры системы такого класса, но и позволяет, с учетом этой архитектуры, с учетом оптималь-

ных функционала, состава и номенклатуры элементов СКБ, определить и обосновать, а по сути – гарантировать, доверенный уровень защищенности, уровень безусловного предохранения ДИПИ от потенциальных угроз.

Более того, результаты прогностического контроля эффективности и надежности СКБ для обеспечения защищенности ДИПИ взаимодействия робота и оператора позволят, еще на этапе проектирования и контрольных испытаний, существенно ограничить, свести к минимуму финансовые и иные расходы на построение и эксплуатацию такой комплексной системы.

Предложен новый подход к построению методики контроля эффективности и надежности СКБ для обеспечения защищенности ДИПИ взаимодействия робота и оператора. Данный подход опирается на математическую модель процесса защиты информации при обмене данными в рамках интерфейса такого класса. Модель позволяет математически воссоздавать и имитировать процесс изменения времени до отказа элементов СКБ для обеспечения защищенности ДИПИ взаимодействия робота и оператора, опираясь на одно из популярных статистических распределений, распределение Вейбулла [20].

Подобный способ применения математической статистики в интересах построения модели процесса защиты информации, позволяет учесть неоднородность процедур в рамках данного процесса и оценить вероятность отказа конструктивных элементов СКБ ДИПИ с течением времени.

Помимо прочего, применение распределения Вейбулла позволяет одновременно решать задачу оптимизации, нацеленную на повышение эффективности и надежности СКБ ДИПИ. При этом в рамках задачи оптимизации учитываются целый комплекс факторов, таких как структура СКБ и ДИПИ, характеристики элементов СКБ ДИПИ, финансовые ограничения, а также риски потенциальных угроз и степень потенциального ущерба для ДИПИ взаимодействия робота и оператора в случае успешной реализации всех этих угроз [21].

Стадиями предложенной методики контроля эффективности и надежности СКБ для обеспечения защищенности ДИПИ взаимодействия робота и оператора, можно считать:

Стадию анализа рисков безопасности и исследования уязвимостей ДИПИ взаимодействия робота и оператора. На этой стадии осуществляется идентификация чувствительных, незащищенных (уязвимых) мест ДИПИ, детальная проверка иммерсивного интерфейса робот-оператор с целью выявления его «ахиллесовых пят», которые потенциально могут стать направлениями программных атак или «точками входа» для иных эксцессов. Здесь может и должна быть осуществлена оценка потенциальных угроз и их последствий для ДИПИ взаимодействия робота и оператора, оценка возможных сценариев атак и их оценка их потенциального воздействия на ДИПИ, что, в конечном итоге, позволяет зафиксировать приоритеты в области защиты интерфейса и разработать соответствующие политику безопасности и стратегии функционирования СКБ ДИПИ взаимодействия робота и оператора для различных экстремальных условий.

Стадию моделирования. На этой стадии распределение Вейбулла находит применение для корректного математического описания изменения времени до отказа элемента СКБ ДИПИ взаимодействия робота и оператора, что позволяет оценить вероятность отказа конкретных элементов системы комплексной безопасности во времени, и, в конечном итоге, позволяет спрогнозировать среднесрочную эффективность функционирования СКБ ДИПИ и ее надежность.

При этом модель использует функцию плотности вероятности (ФПВ) распределения Вейбулла в виде:

$$f(x, c, loc, scale) = \frac{c}{scale}\left(\frac{x - loc}{scale}\right)^{c-1} e^{-\left(\frac{x-loc}{scale}\right)^{c}}, \quad (1)$$

где x – случайная величина (переменная), характеризующая время до отказа конкретного элемента СКБ ДИПИ взаимодействия робота и оператора, c – параметр формы (*shape*) ФПВ, *loc* – параметр положения (*location*) и *scale* – параметр масштаба (разброса) ФПВ случайной величины x.

Тогда очевидно, что, в рамках нашей модели, так называемая, Survival Function – функция надежности распределения Вейбулла, может быть записана в виде [20]:

$$S(x, c, loc, scale) = e^{-\left(\frac{x-loc}{scale}\right)^{c}}. \quad (2)$$

В свою очередь, суммарную цену (стоимость) СКБ ДИПИ взаимодействия робота и оператора находим посредством суммирования цены (стоимости) всех элементов данной системы:

$$totalPrice = \sum_{i=1}^{n} price, \quad (3)$$

где n – количество элементов, входящих в СКБ ДИПИ взаимодействия робота и оператора, *price* – стоимость конкретного отдельного i-го элемента данной системы.

Обобщенная (результирующая) надежность СКБ ДИПИ взаимодействия робота и оператора может быть определена на основе выражения:

$$R_{system} = 100\left(1 - \prod_{i=1}^{n}(1 - R_{comp\,i})\right), \quad (4)$$

где $R_{comp\,i}$ – надежность конкретного *i*-го элемента в составе СКБ ДИПИ взаимодействия робота и оператора.

Стадия анализа параметров распределения и их влияния на СКБ ДИПИ взаимодействия робота и оператора характеризуется процедурой детального исследования данных параметров распределения Вейбулла для понимания, какие факторы влияют на процесс отказа конкретного элемента СКБ ДИПИ, и как эти параметры влияют на характеристики этой системы.

Стадия оптимизации. Задача оптимизации формулируется и решается, имея целью максимизацию эффективности защиты информации и надежности интерфейса при обмене данными посредством ДИПИ взаимодействия робота и оператора, причем учитываются как ограниченные ресурсы, так и структура СКБ ДИПИ, и самого ДИПИ, их уязвимостей.

На этой стадии, помимо прочего, выполняют свои функции частные алгоритмы оптимизации СКБ ДИПИ с учетом ограничений – работают алгоритмы оптимизации, которые учитывают характеристики СКБ ДИПИ и оптимально распределяют ресурсы для повышения ее устойчивости к потенциальным угрозам и к техническим отказам.

Контроль эффективности и надежности СКБ для обеспечения защищенности ДИПИ взаимодействия робота и оператора осуществляется в предположении, что на стадии оптимизации существуют заранее введенные ограничения – предполагается, что любая (каждая) уязвимость l (из M возможных) уязвимостей ДИПИ должна быть «прикрыта», обезврежена хотя бы одним средством безопасности из состава СКБ:

$$\sum_{j \in N} a_{lj}\, x_j \geq 1, \quad \text{для всех } l \in M, \quad (5)$$

где x_j – двухкомпонентные (бинарные) параметры: входит в состав СКБ/ не входит в состав СКБ, характеризующие включение конкретного средства обеспечения защищенности *j* в состав СКБ.

Таким образом, в рамках контроля осуществляется проверка – оптимальна ли СКБ, максимальны ли показатели эффективности и параметры надежности СКБ для обеспечения защищенности ДИПИ взаимодействия робота и оператора. Иными словами, осуществляется контроль – выполняется ли целевая функция:

$$\sum_{j=1}^{n} c_j\, x_j \to min, \text{ при заданных ограничениях:} \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^{n} a_{lj}\, x_j \geq 1, \quad l = 1, \ldots, M;$$

$$x_j \in \{0, 1\}, \quad j = 1, \ldots, n;$$

где a_{lj} – коэффициенты «прикрытия», обезвреживания уязвимости ДИПИ взаимодействия робота и оператора.

Стадия проверки методики и модели для контроля эффективности и надежности СКБ ДИПИ на соответствие требованиям и условиям (верификация).

На этой стадии результаты контроля и моделирования сопоставляются с фактическими, реальными данными, опытными статистическими данными о произошедших коллизиях (сбоях) или атаках, что дает возможность оценить точность модели и корректность методики контроля. На основе результатов сопоставления (сравнения) может быть осуществлена корректировка параметров модели и алгоритма контроля эффективности и надежности СКБ ДИПИ в целом, для повышения их точности и адаптации к конкретным условиям применения интерфейсов такого класса.

Таким образом, рассмотрены актуальность, предпосылки и условия реализации модели и методики контроля эффективности и технической надежности системы комплексной безопасности для обеспечения защищенности современных доверенных иммерсивных интерфейсов взаимодействия робота и оператора. Предложены стадии реализации модели и методики контроля, причем на стадии моделирования процесса защиты информации при обмене данными в рамках интерфейса такого класса использовано статистическое распределение Вейбулла. В рамках практического применения это позволит учесть неоднородность процедур в границах данного процесса и оценить вероятность отказа конструктивных элементов системы комплексной безопасности доверенных иммерсивных интерфейсов взаимодействия робота и оператора с течением времени. Разработан программный прототип (программное обеспечение), позволяющее реализовать подобный контроль.

Литература

1. Борисов О.И., Громов В.С., Пыркин А.А. Методы управления робототехническими приложениями. Учебное пособие. – СПб.: Университет ИТМО, 2016. – 108 с.

2. Каляев И.А., Лохин В.М., Макаров И.М. и др. Интеллектуальные роботы: учебное пособие для вузов / под общей ред. Е.И. Юревича. – М.: Машиностроение, 2007. – 360 с.

3. Громов В.С., Борисов О.И., Синетова М.М. Программирование промышленных роботов серии Mitsubishi Melfa. – СПб: Университет ИТМО, 2023. – 80 с.
4. Стахеева А.А., Крайников А.Н. Разработка Веб-интерфейса управления роботом на основе ROS // Столыпинский вестник. №2, 2023. С. 1058-1078.
5. Бирман И.Б. Пользовательский интерфейс. – М.: Изд-во Бюро Горбунова, 2017. – 302 с.
6. Спасский Б.А. Обзор современных интерфейсных систем операторов мобильных наземных роботов // Робототехника и техническая кибернетика. № 4 (13), 2016. С. 21-31.
7. Паращук И.Б., Чечулин А.А. Защищенность человеко-машинного интерфейса для интеллектуальной транспортной среды // Перспективные направления развития отечественных информационных технологий (ПНРОИТ-2020): Материалы VI межрегиональной научно-практической конференции. Севастополь, 22-26 сентября 2020 / Севастопольский государственный университет. Науч. ред. Б.В. Соколов. – Севастополь: СевГУ, Т. 1, 2020. С. 65-66.
8. Waliczek N. What is Trusted Immersive UI? // Immersive Web at W3C (Jun 20, 2019). [Электронный ресурс]. URL: https://github.com/immersive-web/webxr/issues/718 (дата обращения: 26.05.2024).
9. Малышев К.В. Построение пользовательских интерфейсов. – М.: ДМК Пресс. 2021. – 268 с.
10. Сергеев С.Ф., Падерно П.И., Назаренко Н.А. Введение в проектирование интеллектуальных интерфейсов: Учебное пособие. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2011. – 108 с.
11. Сергеев С. Ф. Обучающие и профессиональные иммерсивные среды. – М.: Народное образование, 2009. – 432 с.
12. Баранов, В.В., Гудков М.А., Крибель А.М., Лаута О.С., Нечепуренко А.П. Защита канала управления роботизированных систем // Труды Межвузовской научно-практической конференции «Актуальные проблемы обеспечения информационной безопасности». – Самара: Изд-во Инсома-Пресс, 2017. С. 32-37.
13. Бородакий Ю.В., Добродеев А.Ю., Бутусов И.В. Доверенная среда – основа гарантированной безопасности. // Information Security / Информационная безопасность. № 2, 2013, С. 36-37.
14. Паращук И.Б., Башкирцев А.С., Саяркин Л.А. Вариант формулировки показателей качества современных средств доверенной загрузки и их роль при решении проблем безопасности алгоритмов управления инфотелекоммуникационными системами специального назначения // Вопросы оборонной техники. Научно-технический журнал. Серия 16, №5-6, 2016. С. 47-51.
15. Вернер О.В. Эволюция подхода к построению доверенной среды. АО «ЭЛВИС-ПЛЮС», 2013 [Электронный ресурс] URL: http://elvis.ru/upload/iblock/53e/verner_trusted-env.pdf (дата обращения: 27.05.2024).
16. Буров А.С. Перспективы создания доверенной платформы. ООО «АльтЭль», 2014. [Электронный ресурс] URL: http://www.altell.ru/about/press-centre/news/АльтЭль%2020Перспективы%20создания%20 доверенной%20платформы.pdf (дата обращения: 27.05.2024).
17. Паращук И.Б., Логинов В.А., Елизаров В.В. Концепция «доверенности» как основа обеспечения защиты информации в телекоммуникационной сети с использованием программно-аппаратной системы, платформы или среды // Научно-технический сборник № 102. Труды академии. – СПб.: ВАС, 2018. С. 302-308.
18. Паращук И.Б., Саенко И.Б., Пантюхин О.И. Доверенные системы для разграничения доступа к информации в облачных инфраструктурах // Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли. 2018. Т. 10. № 6. С. 68-75.
19. Паращук И.Б., Жмуров В.Д., Шестаков Е.О. Доверенная программно-аппаратная среда: сущность, элементы и их роль при защите информации в телекоммуникационных сетях // Региональная информатика и информационная безопасность. Сборник трудов. Выпуск 5 / СПОИСУ. – СПб.: 2018. С. 81-86.
20. Буровский Е.А., Гришунина Ю.Б. Задачи математической статистики и их решение с использованием языка программирования Python: учеб. пособие. – М.: Изд. дом Высшей школы экономики, 2022. – 64 с.
21. Parashchuk I.B., Sayarkin V.A., Mikhailichenko A.V. Analysis of the basic principles and requirements for information security subsystems in electronic document management systems of data centers // World Science: Problems and Innovations: сборник статей LXVII Международной научно-практической конференции. – Пенза: МЦНС Наука и Просвещение. 2022. С. 30-32.

Информация об авторах

Саяркин Виталий Андреевич, курсант, Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования «Военная орденов Жукова и Ленина Краснознаменная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного» Министерства обороны Российской Федерации (Военная академия связи), Россия, 194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 3, vitaliysayarkin@gmail.com

Виноградов Владислав Романович, курсант, Военная академия связи, Россия, 194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 3, vladislavvinogradov4165@gmail.com

Паращук Игорь Борисович, профессор, д.т.н., Заслуженный изобретатель Российской Федерации, профессор кафедры, Военная академия связи, 194064, Россия, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 3, shchuk@rambler.ru, ORCID: 0000-0001-8793-7768

Автономный наземный робот для доставки грузов вне помещения

А.В. Бянкина, М.В. Тарачков✉, А.И. Кошелев, К.В. Маракулин
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Балтийский федеральный университет им. Иммануила Канта» (ФГАОУ ВО БФУ им. И. Канта), Калининград, Россия, mishklgpmi@mail.ru

Аннотация
Приводится описание аппаратной и программной части автономного наземного робота для доставки грузов вне помещений. Робот использует данные о скорости вращения колес, данные инерциально-измерительного модуля, ГНСС-приемника, 2D лазерного дальномера. Программное обеспечение робота создано на базе программной платформы Robot Operating System 2 и пакета Nav2. Данные, получаемые от датчиков, обрабатываются расширенным фильтром Калмана для точного позиционирования робота. Данные лидара используются для обхода препятствий. В заключении приведены результаты испытаний автономного робота.

Ключевые слова
Робототехника, доставка грузов, лидар, облако точек, ГНСС, RTK, планирование движений, Robot Operating System.

Autonomous ground robot for outdoor cargo delivery

Anastasia V. Byankina, Mikhail V. Tarachkov✉, Andrey I. Koshelev, Kirill V. Marakulin
Immanuel Kant Baltic Federal University (IKBFU), Kaliningrad, Russia, mishklgpmi@mail.ru

Abstract
The article describes the hardware and software of an autonomous ground robot for outdoor cargo delivery. The robot uses data on the rotation speed of the wheels, data from the inertial measurement unit, GNSS receiver, and 2D laser rangefinder. The robot's software is based on the Robot Operating System 2 software platform and the Nav2 package. Data received from the sensors is processed by an extended Kalman filter for precise robot positioning. Lidar data is used to avoid obstacles. The conclusion presents the results of testing the autonomous robot.

Key words
Robotics, cargo delivery, lidar, point cloud, GNSS, RTK, motion planning, Robot Operating System.

Введение

Наземные роботы достаточно давно применяются для решения задач в ситуациях, где нахождение человека может нести угрозу жизни и здоровья: ликвидация чрезвычайных ситуаций, радиационная разведка, тушение пожаров, обезвреживание боеприпасов, военные операции [1]. Управление роботом, как правило, осуществляется в дистанционном режиме человеком-оператором, что в целом является надежным решением. В [2] автор оценивает эффективность систем дистанционного управления, приводя примеры, когда временные задержки передачи сигналов могут негативно сказаться на качестве управления. Кроме того, дистанционное управление для задач, в которых происходит повторение одного и того же действия (маршрута), логично выполнять в автоматическом режиме, например, задача доставки грузов. Поэтому разработка автономных наземных роботов считается актуальной задачей.

Целью исследования является разработка автономного наземного робота для доставки грузов вне помещения. Выделены задачи:

1. Создание платформы, которая способная транспортировать груз до 20 кг;
2. Разработка низкоуровневого программного обеспечения (ПО);
3. Разработка и совершенствование существующего ПО для взаимодействия с сенсорами;
4. Интеграция в ПО робота пакета Nav2 [3] для планирования движений и обхода препятствий;
5. Проведение испытаний.

Аппаратная часть робота

Робот обладает шестью ведущими колесами, разделенными на три моста. Каждый мост – это гироскутер, обладающий собственной платой управления, батареей, двумя мотор-колесами. Гироскутер способен развивать скорость до 15 км/ч, обладает грузоподъемностью до 100 кг. С учетом того, что гироскутер является законченным промышленным решением, его аппаратная часть используется без изменений. Программное обеспечение микроконтроллера STM32, расположенного на плате управления, изменено на [4], в котором до-

бавлена возможность обмена данными через интерфейс UART. Для обмена данными с тремя платами управления используется микроконтроллер AtMega2560 (плата Arduino Mega), который обладает тремя аппаратными интерфейсами UART. Это позволяет организовать обмен данными с каждой платой с частотой 100 Гц. Используется бинарный протокол обмена, приведенный в таблице 1. Кроме того, включение и отключение питания реализуется с использованием реле и дублируется кнопками.

Микроконтроллер AtMega2560 обменивается данными с микрокомпьютером Raspberry Pi 4 с помощью интерфейса UART и преобразователя USB-UART. Микрокомпьютер анализирует информацию с датчиков и формирует управляющее воздействие для плат управления колесами.

Используются следующие датчики:

1. На каждом колесе расположены датчики Холла, которые позволяют измерить скорость и направление вращения каждого из колес;
2. Инерциально-измерительный модуль (ИИМ) Taobotics HFI-A9 обеспечивает информацию от акселерометра, гироскопа и магнетометра. Кроме того, ИИМ обладает встроенным фильтром Калмана, таким образом, обеспечивается информация об ориентации робота, выраженная в кватернионах.
3. ГНСС-приемник Ublox F9P обеспечивает текущую координату робота в системе координат WGS 84. Для осуществления навигации робота его положение из системы координат WGS 84 преобразуется в систему координат UTM. Погрешность составляет не более 1 м. Используемый ГНСС-приемник работает также в режиме Real Time Kinematic (RTK), использование которого уменьшает погрешность до 10 см.
4. 2D-лидар Hokuyo UTM-30LX с дальностью до 30 м и погрешностью измерений до 5 см.

На роботе также установлен роутер, обеспечивающий связь между микрокомпьютером робота и компьютером оператора по беспроводному каналу. Схема аппаратной части робота приведена на рисунке 1.

Таблица 1 — Описание протокола обмена

Команда управления		
№	**Описание**	**Тип данных**
1	Стартовый байт (0xABCD)	unsigned int 16
2	Уставка скорости левого колеса (об/мин)	signed int 16
3	Уставка скорости правого колеса (об/мин)	signed int 16
4	Контрольная сумма	unsigned int 16
Информация о состоянии платы управления		
№	**Описание**	**Тип данных**
1	Стартовый байт (0xABCD)	unsigned int 16
2	Уставка скорости левого колеса (об/мин)	signed int 16
3	Уставка скорости правого колеса (об/мин)	signed int 16
4	Текущая скорость левого колеса (об/мин)	signed int 16
5	Текущая скорость правого колеса (об/мин)	signed int 16
6	Напряжение батареи (В x100)	signed int 16
7	Температура (гр. Цельсия x10)	signed int 16
8	Контрольная сумма	unsigned int 16

Программное обеспечение

Микрокомпьютер Raspberry Pi 4 и компьютер оператора работают под управлением операционной системы Linux Ubuntu 22.04. Программное обеспечение автономного робота создано на базе программной платформы Robot Operating System 2 (ROS 2), которая позволяет объединить несколько программ (узлов) при помощи механизма обмена сообщениями. ROS 2 – это большое сообщество, уже существует большое количество пакетов (наборы программ) для взаимодействия с оборудованием, для управления роботом. Одним из таких пакетов является Nav2, реализующий автономное перемещение робота по данным от датчиков.

Данные от каждого датчика поступают в соответствующие узлы через последовательный порт в соответствии с протоколом обмена. Также доступна возможность настраивать датчики, параметры хранятся в конфигурационных файлах.

Используются следующие узлы:

1. Узел взаимодействия с платами управления реализует обмен с микроконтроллерами плат по протоколу, приведенному в таблице 1. Передает данные о текущих угловых скоростях каждого из колес, получает уставки угловых скоростей.
2. Узел взаимодействия с ИИМ получает данные об ориентации робота с частотой 100 Гц.
3. Узел взаимодействия с ГНСС настраивает ГНСС-приемник для получения данных о положении робота и для приема поправок RTK.
4. Узел взаимодействия с лидаром обеспечивает получение облака точек.

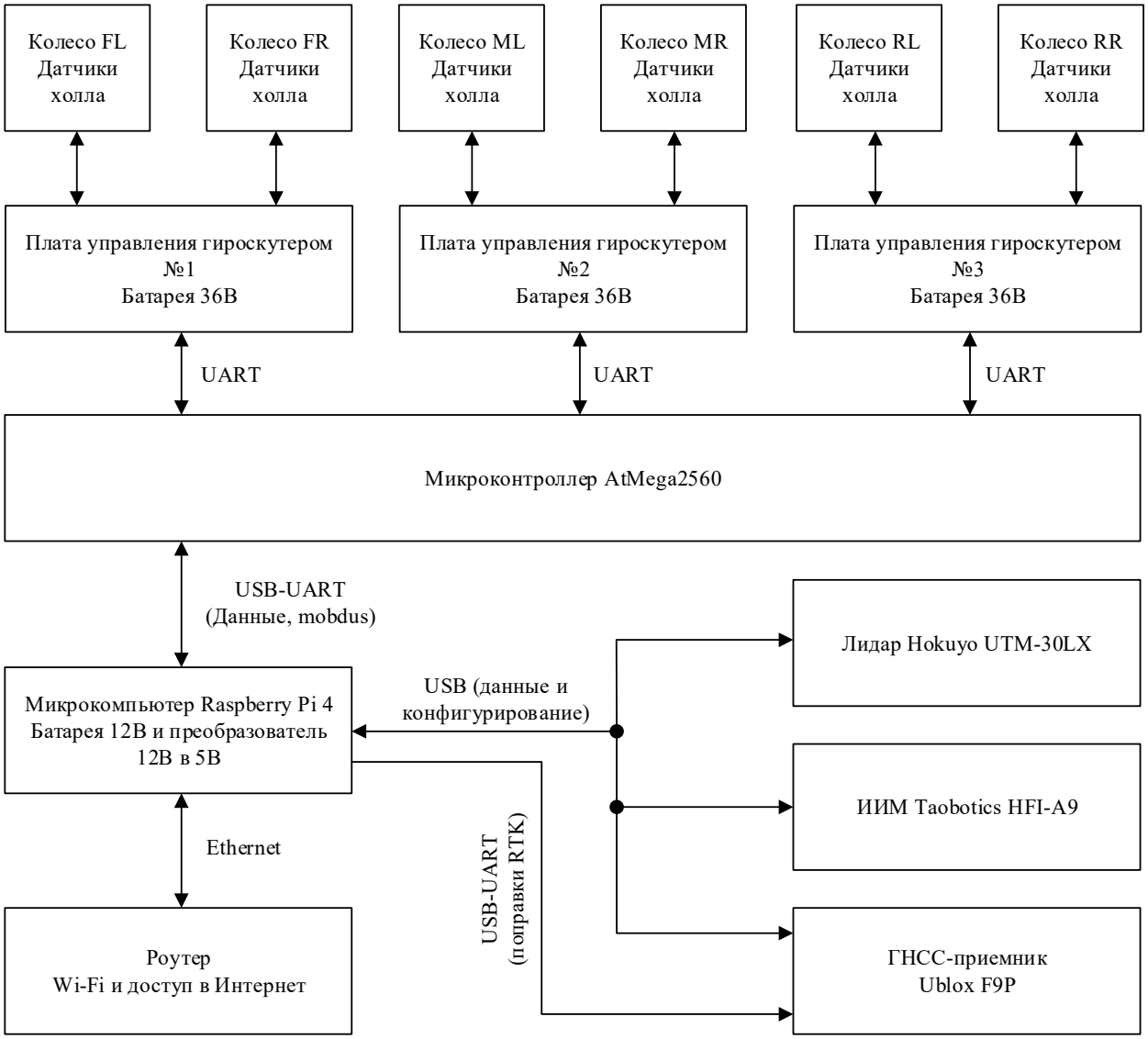


Рисунок 1 — Схема аппаратной части робота

5. Узел расчета одометрии преобразует угловые скорости колес $\omega_1 \dots \omega_6$ в линейную v_x и угловую ω_z скорости робота по формулам:

$$v_x = {R(\omega_R + \omega_L)}/{2},$$
$$\omega_z = {R(\omega_R + \omega_L)}/{S},$$

где ω_R – среднее арифметическое угловых скоростей правых колес, ω_L – левых, R – радиус колеса, S – колесная база. Обратная задача решается с использованием формул:

$$\omega_L = {v_x}/{R} - {S\omega_z}/{(2R)},$$
$$\omega_R = {v_x}/{R} + {S\omega_z}/{(2R)}.$$

6. Расширенный фильтр Калмана [5] реализован с использованием пакета robot_localization и позволяет уточнить значение каждого из датчиков. В результате получаются утонённые данные о положении и ориентации робота.

7. Планировщик Nav2 осуществляет расчет траектории робота в заданную точку с учетом данных о препятствиях. А также следит за тем, чтобы робот следовал заданной траектории. При обнаружении препятствия, траектория перестраивается. При невозможности достичь заданной точки, робот останавливается. Ключевыми настройками планировщика Nav2 являются точность достижения заданной точки по осям X и Y, точность достижения заданного поворота вокруг оси Z, а также радиус, который определяет зону безопасности вокруг робота.

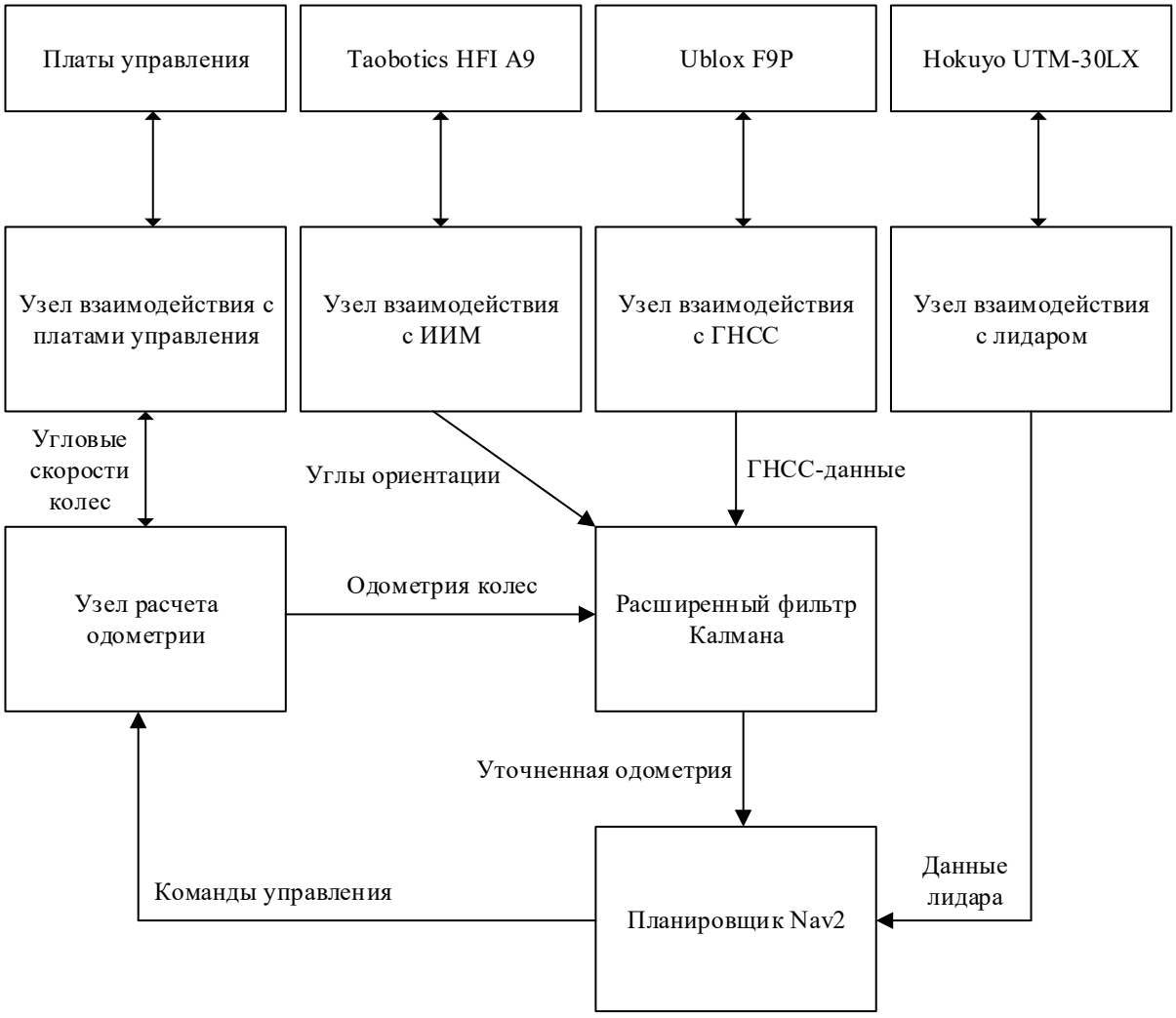


Рисунок 2 — Схема взаимодействия узлов ROS 2

Для достижения корректной работы расширенного фильтра Калмана параметры расположения датчиков указаны в описании робота в формате URDF согласно стандарту REP 105.

Испытания автономного наземного робота

1. Проверка точности позиционирования.

Данная проверка выполнялась на ровной горизонтальной поверхности без препятствий. Были использованы два набора параметров Nav2, задающих точность позиционирования робота, при которой будет считаться, что робот достиг заданной цели. Результаты шести испытаний приведены в таблице 2.

Таблица 2 — Результаты испытаний точности позиционирования

№	Заданная точность XY (м.)	Заданная точность Θ (рад.)	Достигнутая точность XY (м)	Достигнутая точность Θ (рад.)	Вердикт
1	0.1	0.125	0.098	0.11	Пройден
2	0.1	0.125	0.09	0.12	Пройден
3	0.1	0.125	0.095	0.114	Пройден
4	0.05	0.0625	нет	нет	Не пройден
5	0.05	0.0625	0.041	0.06	Пройден
6	0.05	0.0625	нет	нет	Не пройден

Данная проверка выполнялась на ровной горизонтальной поверхности без препятствий. Роботу задавалась точка в пространстве и ориентация, которых он должен был достичь. В результате испытаний при высокой точности робот кружил вокруг точки и не мог ее достичь. Однако, при уменьшении точности все тесты были выполнены.

2. Обход препятствий.

Испытания по обходу препятствий разбиты на 2 этапа. В первую очередь, проверялось передвижение робота рядом с крупными объектами, такими как забор. На рисунке 3 изображено, как автономный робот «видит» забор. Использовалась программа RViz. Испытание показало, что при обнаружении забора и при приближении к нему, робот его объезжает.

Второе испытание – это объезд препятствий (рис. 4). Роботу предстояло проехать между коробками, которые были установлены на расстоянии, превышающем ширину робота в 2 раза. Робот успешно справлялся и проезжал мимо коробок. При уменьшении расстояния до сопоставимого с шириной робота наблюдались касания роботом коробок.

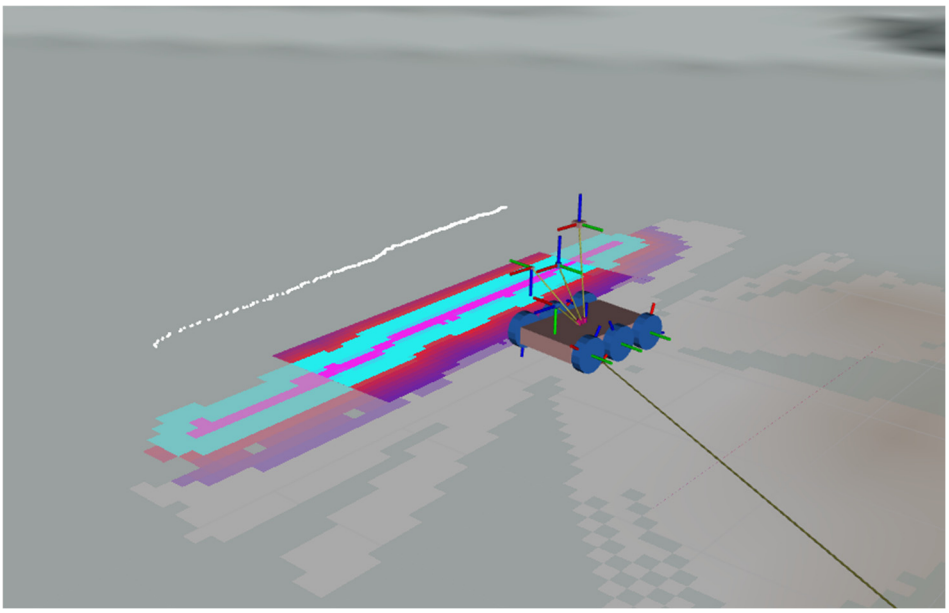


Рисунок 3 — Робот, спозиционированный параллельно забору, вид из среды RViz

Рисунок 4 — Робот и коробки, использованные в качестве препятствий

Также было важно проверить, насколько хорошо робот объезжает людей. Для этого человек шагом (около 6 км/ч) выходил на траекторию движения робота. В случае, когда человек появлялся сразу в зоне сканирования лидара, робот останавливался в течение 1 секунды и изменял маршрут. Если человек появлялся из-за робота, то робот допускал наезд.

Заключение

Автономный наземный робот был собран, запрограммирован и испытан. Результаты испытаний показали, что концепция жизнеспособна, и позволили определить слабые места.

Конструкция робота требует доработки. Испытания показали, что роботу тяжело осуществлять поворот вокруг своей оси. Установка усовершенствованной подвески должна решить данную проблему, кроме того, подвеска будет способствовать более плавному прохождению препятствий.

2D-лидар обладает ограниченной зоной видимости. Его следует заменить либо на 3D-лидар, либо на RGB-D камеру. Однако, данные изменения также потребуют более производительного бортового компьютера и увеличат энергопотребление.

Роботу необходима защита от дождя.

Литература

1. Лопота А. В. Мобильные наземные робототехнические комплексы профессионального назначения / А. В. Лопота, Б. А. Спасский //Робототехника и техническая кибернетика. – 2020. – Т. 8. – №. 1. – С. 5-17.
2. Попов Д. С. Эффективность систем дистанционного управления наземными мобильными роботами в условиях действия временных задержек в каналах передачи информации //Экстремальная робототехника. – 2022. – Т. 1. – №. 1. – С. 164.
3. Accountability and Explainability in Robotics: A Proof of Concept for ROS 2-And Nav2-Based Mobile Robots / L. Fernández-Becerra, M. A. González-Santamarta, D. Sobrín-Hidalgo etc. //Computational Intelligence in Security for Information Systems Conference. – Cham : Springer Nature Switzerland, 2023. – P. 3-13.
4. Github.com, EFeru/hoverboard-firmware-hack-FOC [Электронный ресурс]. URL: https://github.com/EFeru/hoverboard-firmware-hack-FOC. (Дата обращения 24.10.2024).
5. Кучерский Р. В. Алгоритмы локальной навигации и картографии для бортовой системы управления автономного мобильного робота / Р. В. Кучерский, С. В. Манько // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2012. – Т. 128. – №. 3. – С. 13-22.

Информация об авторах

Бянкина Анастасия Васильевна, студент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Балтийский федеральный университет им. Иммануила Канта» (ФГАОУ ВО БФУ им. И. Канта), высшая школа компьютерных наук и искусственного интеллекта, Россия, 236041, Калининград, ул. А. Невского, д. 14

Тарачков Михаил Владимирович, старший преподаватель, БФУ им. И. Канта, образовательно-научный кластер «Институт высоких технологий», Россия, 236041, Калининград, ул. А. Невского, д. 14, mishklgpmi@mail.ru

Кошелев Андрей Игоревич, студент, ФГАОУ ВО БФУ им. И. Канта, высшая школа компьютерных наук и искусственного интеллекта, Россия, 236041, Калининград, ул. А. Невского, д. 14

Маракулин Кирилл Витальевич, студент, ФГАОУ ВО БФУ им. И. Канта, высшая школа компьютерных наук и искусственного интеллекта, Россия, 236041, Калининград, ул. А. Невского, д. 14

Робототехнические стартапы в России: основные направления, проблемы и возможности

М.М. Миронов
ООО «Робиком», Москва, Россия, matvey_maksimovich@mail.ru

Аннотация
В статье рассматриваются ключевые направления развития робототехнических стартапов в России, включая промышленных роботов, сервисных роботов, сельскохозяйственных роботов, медицинские и другие. Статья анализирует основные проблемы, с которыми сталкиваются стартапы в этой области, включая высокие затраты на разработку и сложности с коммерциализацией. Представлены карта возможностей для стартапов, примеры наших проектов, направленных на роботизацию различных процессов, а также обсуждаются бизнес-модели и решения для успешного внедрения робототехнических инноваций. Миссия компании заключается в создании инновационных робототехнических решений, которые повышают эффективность и конкурентоспособность предприятий в различных отраслях

Ключевые слова
Стартапы в робототехнике, Бизнес-модели робототехники, Автоматизация процессов, Робиком, Технологические инновации, карта возможностей стартапов.

Robotics startups in Russia: main directions, problems and opportunities

Matvey M. Mironov
ROBOT&CO LTD, Moscow, Russia, matvey_maksimovich@mail.ru

Abstract
The article presents key directions for the development of robotic startups in Russia, including industrial robots, service robots, agricultural robots, medical robots, and others. The article analyzes the main problems faced by startups in this field, including high development costs and commercialization challenges. It presents a map of opportunities for startups, examples of our projects aimed at robotizing various processes, and discusses business models and solutions for the successful implementation of robotic innovations. The company's mission is to create innovative robotic solutions that enhance the efficiency and competitiveness of enterprises across various industries.

Key words
Robotics startups, Robotics business model, process automation, Robot& Co, Technological innovations.

Введение

Робототехнические стартапы – это инновационные компании, которые занимаются разработкой и производством роботов. В последние несколько лет робототехника в России стремительно развивается [1], охватывая все больше областей и влияя на различные сектора экономики. Российские предприятия и исследовательские центры активно разрабатывают и внедряют передовые решения. Именно поэтому в России робототехнические стартапы имеют большой потенциал для развития и внедрения новых технологий в различные отрасли экономики.

Однако, несмотря на достижения, перед отраслью стоит множество вызовов, связанных с созданием и внедрением инноваций. В этой статье мы рассмотрим основные направления робототехнических стартапов в России, проблемы, с которыми сталкиваются стартапы в этой области, а также представим наши собственные проекты и миссию компании.

Направления робототехнических стартапов в России

В России робототехника развивается по нескольким ключевым направлениям:

1. Промышленные роботы и манипуляторы: драйвер роста экономики и производств в России. На данный момент самый большой сегмент. Позволяет улучшить производительность и качество продукции [2].
2. Сервисная робототехника: имеет огромный потенциал для роста, так как глобальная экономика строится на сервисной модели.
3. Беспилотные транспортные средства и системы помощи водителю: Разработки в области автономного вождения и интеллектуальных систем помощи водителю нацелены на повышение безопасности дорожного движения и оптимизацию логистических процессов [3][4].
4. Агророботы и роботы в сельском хозяйстве: Продовольственная безопасность недостижима без роботизации сельского хозяйства [5].

5. Беспилотные летательные аппараты: Дроны используются для различных целей, от мониторинга состояния полей до доставки товаров, что открывает новые возможности для бизнеса и госуправления[6].
6. Антропоморфные роботы: один из самых больших сегментов по инвестициям в связи с тем, что человекоподобные роботы способны раскрыть потенциал ИИ.
7. Искусственный интеллект: Языковые модели должны стать катализатором для новых идей для робототехники.

Проблемы стартапов

Все вышеперечисленные направления стартапов объединяет одно – проблемы, с которыми сталкиваются стартапы [7]:

1. Недостаток финансирования и инвестиций: многие стартапы нуждаются в дополнительных средствах для разработки и внедрения своих проектов, а также масштабирования бизнеса, особенно на ранней стадии развития.
2. Сложности с коммерциализацией.
3. Высокая стоимость разработки и производства: в большинстве случаев, робототехнические стартапы физические и программные продукты, что значительно повышает общую стоимость разработки.
4. Отсутствие инфраструктуры для использования роботов: в России еще не создана достаточная инфраструктура для развития робототехники, включая центры разработки, лаборатории, исследовательские центры, робототехнические ассоциации.
5. Недостаток квалифицированных кадров: для разработки и внедрения робототехнических решений требуются специалисты в области робототехники, программирования, электроники и других смежных областей.
6. Сложность интеграции роботов в существующие производственные и сервисные процессы: некоторые компании могут быть не готовы к внедрению новых технологий.
7. Сложности с законодательством и регулированием: некоторые отрасли требуют особого регулирования и лицензирования. Это может затруднять развитие робототехнических стартапов в данных направлениях.
8. Ограниченная государственная поддержка, налоговых льгот и мер стимулирования: в России существует недостаточное количество программ и грантов, налоговых льгот и мер направленных на поддержку робототехнических стартапов.
9. Необходимость обучения персонала работе с роботами.

Возможности для стартапов

Для решения большинства указанных выше проблем мы разработали карту возможностей для стартапов в зависимости от стадии развития проекта:

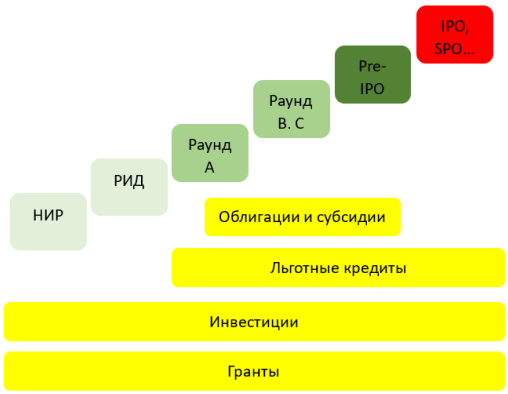


Рисунок 1 — Карта возможностей стартапов

Гранты: один из самых доступных и простых способов привлечения инвестиций в стартап, который подходит для любой стадии развития проекта. Одной из самых популярных программ получения грантов являются гранты от Фонда Содействия Инновациям. Преимуществом для успешного получения грантов может послужить получение статуса резидента Сколково, статуса МТК (малых технологических компаний), статуса участников МИК (московского инновационного кластера).

Инвестиции: данный подход подходит для любой стадии развития стартапа. Однако при привлечении инвестиций от бизнес-ангелов, инвесторов, фондов – стартапы сталкиваются с вышеуказанными проблемами. Одним из решений данной проблемы могут послужить гранты инвесторам на возмещение инвестиций.

Льготные кредиты: подходит для стартапов, у которых уже сформирован стабильный поток денежных средств. В России имеется различные льготные кредиты от государства для технологических компаний. Такие льготные кредиты можно посмотреть на конструкторе госпрограмм.

Облигации и субсидии: подходит для зрелых и крупных стартапов, которые имеют достаточную выручку. Можно воспользоваться крупными субсидиями, например, грантами на доращивание, субсидиями на возмещение затрат на покупку оборудования, субсидирование ставки по облигациям и так далее.

Бизнес-модель для стартапов в области робототехники

Так как робототехнические стартапы в России сталкиваются с уникальными вызовами, проблемами и возможностями, то для формирования бизнес-модели требуются особый подход. Ключевыми элементами успешной модели являются:

- Наличие инновационного продукта: разрабатывать решения, с высоким спросом на рынке.
- Финансирование: найти надежные источники финансирования,
- Партнерство и коллаборация: сотрудничество с научными и производственными организациями.
- Адаптация к рынку: гибкость и адаптация к изменениям на рынке.
- Команда: команда специалистов, готовых развивать стартап.
- Умение выделяться: привносить новые способы, подходы и технологии, которые привлекают внимание к стартапу.

С помощью бизнеса-модели Александра Остервальдера и Ива Пинье[7] можно описать все эти указанные пункты, как показано на следующем рисунке :

Рисунок 1 — Бизнес модель робототехнического стартапа

Структура и планы развития нашей робототехнической компании

С учетом всех вышеуказанных особенностей, мы строим свою экосистему, которая позволит нам стать лидерами рынка робототехники.

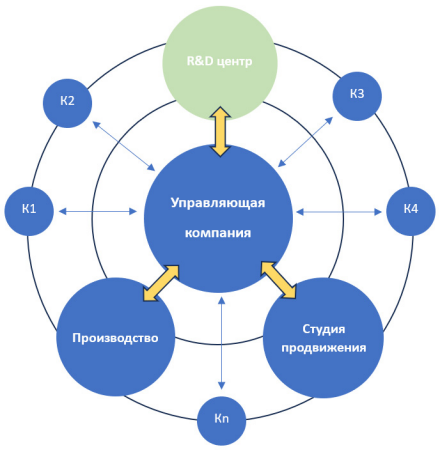


Рисунок 3 — Развиваемая структура компании Робиком

На данный момент мы находимся в первой стадии развития экосистемы – открытия собственного R&D центра. Такой подход дает нам определенные преимущества:

1. Получение дохода на развития экосистемы от заказных разработок или исследований.
2. Увеличение узнаваемости и статуса нашей компании.
3. Наработка технологий, решений, интеллектуальной собственности.

4. Получение и отработка опыта.

Миссия и подходы нашей компании по развитию робототехники

Наша миссия заключается в создании инновационных робототехнических решений, которые повышают эффективность и конкурентоспособность предприятий в различных отраслях.

Для успешного внедрения наших проектов мы предлагаем следующие подходы:

1. Интеграция инноваций.
2. Обучение и поддержка клиентов.
3. Сотрудничество с научными и производственными организациями.
4. Устойчивое развитие.

Наши проекты

В рамках работы нашего R&D центра мы реализовали следующие проекты:

Концепт дизайн переносной системы мониторинга воздуха с системой построения загрязненности местности в режиме онлайн.

Рисунок 4 — Концепт дизайн переносной системы мониторинга воздуха, разработанный компанией Робиком

Прототип гибкого робототехнического захвата для взаимодействия робота с предметами сложной формы.

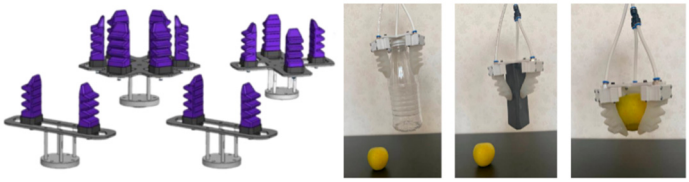


Рисунок 5 — Прототип гибкого робототехнического захвата, разработанный компанией Робиком

Концепт дизайн системы GPS треккинга для животных

Рисунок 6 — Концепт дизайн системы GPS треккинга для животных, разработанный компанией Робиком

Концепт дизайн агротехнического автономного робота для мониторинга теплиц.

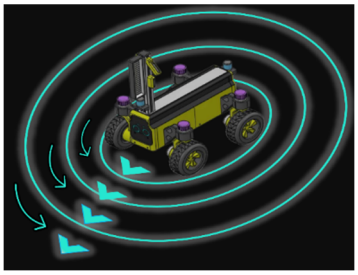


Рисунок 7 — Концепт дизайн агротехнического робота, разработанный компанией Робиком

Исследовательская работа по разработке беспилотной сельскохозяйственной техники.

Рисунок 8 — Исследовательская работа по разработке беспилотной сельскохозяйственной техники, проведенной компанией Робиком

Заключение

Несмотря на многочисленные вызовы, российская робототехнические стартапы демонстрирует значительный потенциал в различных областях. Наши проекты в области гибких захватов, роботизации разнообразных процессов, разработки концепт дизайнов подтверждают важность и перспективность инноваций в этих секторах.

Однако для успешного внедрения робототехнических решений требуется не только технологическое опыт, но и стратегический подход к бизнесу, четкое понимание рыночных тенденций и готовность преодолевать возникающие трудности. Синергия технологий и предпринимательства станет ключом к успешному продвижению России на мировой рынке робототехники и стартапов.

Литература

1. Минпромторг: к 2030 году на российских предприятиях должно появиться более 94 тыс. роботов. Электроный ресурс. Ссылка: [Минпромторг: к 2030 году на российских предприятиях должно появиться более 94 тыс. роботов / Хабр (habr.com)]. Последнее обращение: 15.08.2024
2. Галин Р. Р. и др. Взаимодействие человека и робота в коллаборативных робототехнических системах //Известия Юго-Западного государственного университета. – 2021. – Т. 24. – №. 4. – С. 180-199.
3. Я. Вассуф, В. В. Серебренный, Е. А. Яковлева. Усовершенствованные системы помощи водителю для общественного транспорта // Наука, технологии и бизнес 2022 : Материалы IV Межвузовской конференции аспирантов, соискателей и молодых ученых, Москва, 27–28 апреля 2022 года. – Москва: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2022. – с. 333-346.
4. Я. Вассуф, Е. М. Кореков и В. В. Серебренный. Принятие решений для передовых систем помощи водителю общественного транспорта. // 2023 г. 5-я Международная молодежная конференция по радиоэлектронике, электротехнике и энергетике (REEPE), Москва, Российская Федерация, 2023 г., с. 1-6.
5. Зобнин А. Н. Агророботы в сельском хозяйстве //Академическая публицистика. – 2018. – №. 5. – С. 85-87.
6. РОМАНОВА Н. В. Характеристика рынка беспилотных летательных аппаратов: запрос и сферы применения //Самоуправление. – 2020. – №. 4. – С. 434-437.
7. Пинье И., Остервальдер А. Построение бизнес-моделей. Настольная книга стратега и новатора //М.:«Альпина Диджитал. – 2010.
8. Баранов П. П. Правовое регулирование робототехники и искусственного интеллекта в России: некоторые подходы к решению проблемы //Северо-Кавказский юридический вестник. – 2018. – №. 1. – С. 39-45.

Автоматическое обнаружение и захват заранее заданных объектов манипулятором мобильного робота

С.А. Собольников[1,2]✉, Н.А. Куликов[1,2], Д.Д. Подколзин[1,2]
[1]Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики имени Н. Л. Духова» (ФГУП ВНИИА), Москва, Россия, SASobolnikov@vniia.ru
[2]Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН» (ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»), Москва, Россия

Аннотация
В статье рассматривается разработка системы захвата целевого объекта манипулятором мобильного робота на основе данных, полученных от двухуровневой системы локализации объектов по видеоизображению. В первой части представлен анализ методов оценки положения и ориентации объектов. Предложена структура двухуровневой системы локализации объектов, основанная на применениях глубоких сверхточных нейронных сетей. Первый уровень отвечает за определение курса и дистанции до объекта, второй — за определение положения и ориентации. Описан подход к генерации синтетических наборов данных, что существенно снижает время и трудоемкость обучения нейронной сети. Во второй части описана система управления манипулятором и платформой, представлен алгоритм работы системы, а также экспериментальные исследования на реальных роботах.

Ключевые слова
Робототехническая система, интеллектуальные системы, захват объектов, машинное обучение, нейронные сети.

Automatic detection and grasping of predefined objects by the mobile robot manipulator

Sergey A. Sobolnikov[1,2]✉, Nikita A. Kulikov[1,2], Danil D. Podkolzin[1,2]
[1]Federal State Unitary Enterprise Dukhov Automatics Research Institute (VNIIA), Moscow, Russia, SASobolnikov@vniia.ru
[2]MSTU «STANKIN», Moscow, Russia

Abstract
The article discusses the development of a target object capture system for a mobile robot's manipulator based on data obtained from a two-tier object localization system using video images. The first part presents an analysis of methods for estimating the position and orientation of objects. A structure for the two-tier localization system based on the use of deep convolution neural networks is proposed. The first tier is responsible for determining course and distance to the object, while the second tier focuses on determining its position and orientation. An approach to generating synthetic datasets is described, significantly reducing the time and labor involved in training the neural network. The second part examines the control system for the manipulator and platform, presents the algorithm for the system's operation and reports on experimental studies real robots.

Key words
Robotic system, intelligent systems, object grasping, machine learning, neural networks.

Введение

В настоящее время активное развитие получает область робототехники, связанная с созданием мобильных роботов с функцией автоматического захвата объектов. Исследования в этой области имеют огромный потенциал применения в самых разнообразных сферах - от промышленности до медицины. В задачах, сопряженных с высоким риском для человеческой жизни или здоровья, например, в атомной промышленности или во время космических исследований, такие роботы могут стать незаменимыми помощниками. На производственных линиях и складах они могут повысить эффективность работы, сократив время и снизив затраты на логистику. Однако создание таких систем связано с рядом сложностей. Так необходимо учитывать ограничения, присущие всем мобильным роботам, на массу, габариты, энергопотребление, канал связи и т.д.

Важность данной работы подтверждается многочисленными соревнованиями, объединяющими исследования автоматического захвата объектов в различных областях: определение положения и ориентации объектов [1], выбор точки захвата [2], разработка систем управления для навигации мобильных роботов и захвата манипулятором [3]. Исследования первого конкурса посвящены методам определения положения и ориентации объектов, данные которых необходимы для управления манипулятором. Работы второго конкурса расширяют информацию для манипулятора, ориентируя захватное устройство в загроможденных средах. Третий

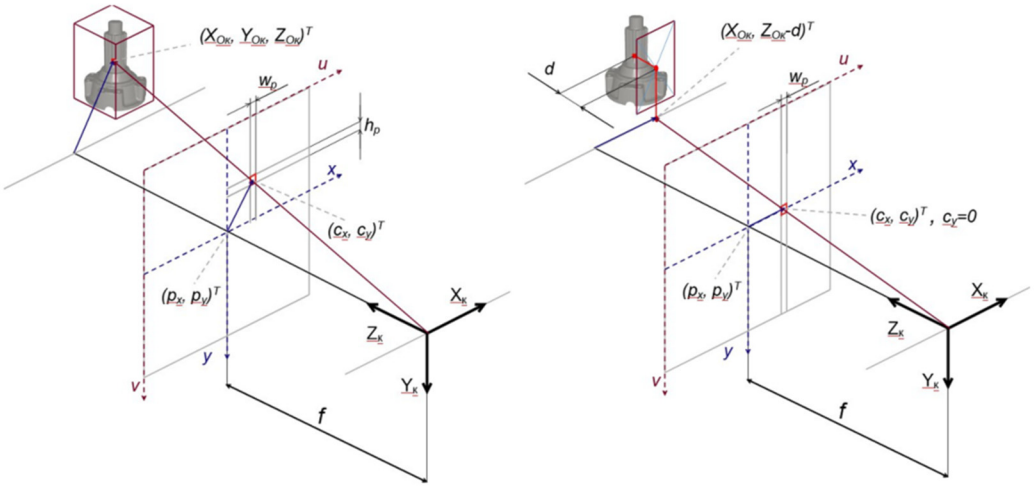
конкурс представляет комплексную систему управления мобильным роботом с манипулятором для автоматического захвата объектов, основанную на обучении с агентами. В данной работе предлагается комплексная система управления для захвата заранее определенных объектов в свободных от загромождения средах без использования обучения с агентами. Также разработана двухуровневая система локализации объектов, информация из которой применяется в управлении шасси и манипулятором.

Двухуровневая система локализации целевых объектов в пространстве по видеоизображению

Двухуровневая система локализации целевых объектов [4] состоит из двух подсистем, основанных на архитектуре глубокой сверточной нейронной сети (ГСНС) EfficientPose [5]. Первая подсистема предназначена для определения положения и ориентации (ОПиО) заранее заданных осесимметричных объектов. Вторая подсистема, полученная путем модификации архитектуры EfficientPose, выполняет определение дистанции и курса (ОДиК) до объекта.

При адаптации архитектуры для задачи определения дистанции и курса были внесены изменения в головную часть модели и изменен подход к расчету ошибки. Модуль определения ориентации в головной части не используется из-за его избыточности для данной задачи, а при преобразовании центральной точки объекта из системы координат изображения в систему координат камеры не учитывается смещение объекта по оси Y. На рисунке 1 схематически показано проецирование центральной точки объекта на плоскость изображения: в 3а для определения положения и ориентации, в 3б для определения дистанции и курса. Для ОПиО центр объекта интереса $(X_{OK}, Y_{OK}, Z_{OK})^T$ рассчитывается в трехмерной системе координат камеры $(X_K, Y_K, Z_K)^T$ в головной части архитектуры ГСНС и зависит от предсказанной точки центра объекта в системе координат (СК) изображения $(c_x, c_y)^T$. Для ОДиК центр объекта рассчитывается в системе координат камеры без учета оси Y и требует только значение по оси X в СК изображения.

При преобразовании координат объекта из плоскости изображения в СК камеры используется фокусное расстояние, полученное при калибровке камеры с определенным разрешением изображения. Причем для каждой из осей изображения *x* и *y* оно может отличаться, и зависит от размера пикселей $(h_p \times w_p)$.



а) **б)**

Рисунок 1 — Проецирование центральной точки объекта на плоскость изображения: а) для определения положения и ориентации; б) для определения дистанции и курса

Координаты объекта по осям X и Y вычисляются по следующей формуле:

$$\begin{bmatrix} X_{OK} \\ Y_{OK} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{(c_x - p_x)\cdot Z_{OK}}{f_x} \\ \frac{(c_y - p_y)\cdot Z_{OK}}{f_y} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где $(X_{OK}, Y_{OK}, Z_{OK})^T$ – координаты центра объекта относительно СК камеры (мм); $(c_x, c_y)^T$ и $(p_x, p_y)^T$ – координаты центра объекта на изображении и центр изображения соответственно (в пикселях), относительно СК изображения (левый верхний угол); $(f_x, f_y)^T$ – фокусное расстояние по оси X и Y в системе координат камеры (в пикселях), берется из внутренней матрицы камеры.

При обучении архитектуры EfficientPose для задачи ОПиО используется метрика Average Distance Difference (ADD) [6]:

$$ADD = \frac{1}{N} \sum_{x \in M} \left\| P - \hat{P} \right\|, \quad (2)$$

где N - число точек в 3D модели объекта; M - множество точек $3D$ модели; $P = Rx + t$ - истинные координаты точки объекта (R и t - матрицы поворота и переноса соответственно); $\hat{P}$ – предсказанные координаты.

Метрика ADD оценивает степень согласованности между истинным и предсказанным положением объекта, учитывая геометрические характеристики объекта.

При обучении модели для задачи ОДиК используется новый механизм расчета ошибки в процессе обучения в отличии от ОПиО. В СК камеры рассматривается вектор l, начало которого располагается в оптическом центре камеры, а конец - в середине ограничивающего прямоугольника фронтальной плоскости объекта. Вычисление ошибки основано на расстоянии между векторами истинного положения объекта (l) и предсказанного положения (l'). На этапах обучения и вычисления используется норма разности между этими двумя векторами:

$$d(l, l') = \|l - l'\| \quad (3)$$

Архитектуры моделей в обоих подсистемах обучались на полностью синтетических наборах данных

Генерация синтетического набора данных

Производительность и точность глубоких сверточных нейронных сетей (ГСНС) зависят от тренировочных данных, но создание реальных наборов требует значительных ресурсов, особенно при разнообразии сценариев. Поэтому используют синтетические наборы данных (СНД), позволяющие моделировать трудновоспроизводимые условия, что актуально в атомной и военной промышленности. Они сокращают время создания и обеспечивают разнообразие информации, полезное для разработки моделей машинного обучения. В данной работе для обеих подсистем были сгенерированы СНД.

В данной работе используется комбинированный подход к генерации СНД, реализованный с помощью инструмента BlenderProc [7]. В подходе сочетается физический рендеринг (Physic Based Rendering, PBR) и доменная рандомизация (Domain Randomization, DR). PBR обеспечивает реалистичные визуализации, моделируя свойства материалов и взаимодействие с ними света. В данной работе PBR используется для создания сложных сцен с эффектами рассеяния, преломления и отражений. DR создает множество уникальных сцен путем случайной вариации параметров объектов, текстур, цветов и освещения, формируя разнообразный обучающий набор и повышая адаптивность модели к реальным условиям. Совмещение PBR и DR позволяет генерировать реалистичные сцены с разнообразием обучающих образцов, повышая обобщающую способность моделей.

Наборы данных создавались с учетом задачи для каждой подсистемы. Для подсистемы определения дистанции и курса генерировались изображения с объектами за пределами рабочей зоны манипулятора. Для второй подсистемы создавались изображения с объектами в пределах рабочей зоны. На рисунке 2 представлены сгенерированные изображения для каждой подсистемы.

а) **б)**

Рисунок 2 — Пример генерации фотореалистичных изображений: а) для первой подсистемы; б) для второй

В качестве объектов интереса были выбраны детали межосевого дифференциала, они обладают разнообразной формой и габаритами. Было сгенерировано по 65 тысяч обучающих изображений для каждой подсистемы.

Система управления манипулятором мобильного робота РТК-СИ и РТК-СПАМ

Система управления манипулятором мобильных роботов РТК-СИ и РТК-СПАМ разработана с использованием ROS2 в качестве основной программной среды, визуализатора RViz, а также библиотек MoveIt и OMPL. Модели роботов описаны в формате URDF, что позволяет определить структуру, кинематику и динамику манипулятора, а также выполнять расчёты столкновений между деталями конструкции мобильного робота.

Для создания URDF-модели манипулятора трёхмерная модель была преобразована в формат STL. Звеньям манипулятора присвоены локальные системы координат для привязки степеней подвижности (СП), что позволило задать различные типы СП: вращательные, непрерывные и призматические.

После разработки модели в формате URDF были созданы компоненты для взаимодействия с реальным оборудованием и настройки контроллеров робота, используя фреймворк ros2_control. Этот фреймворк предоставляет аппаратный интерфейс, диспетчер контроллеров и набор контроллеров для управления механизмами робота. Аппаратный интерфейс отвечает за взаимодействие с аппаратными компонентами, такими как датчики и приводы.

Контроллеры в ROS2 функционируют как интерфейсы для приложений, обмениваясь данными через сообщения ROS2. Управление состояниями контроллеров (загружен, выгружен, запущен) осуществляется диспетчером контроллеров, который также позволяет динамически загружать и выгружать контроллеры и переключаться между ними во время работы. Это обеспечивает гибкое управление СП.

В настоящей работе использован контроллер JointTrajectoryController для управления движением по заданным траекториям. Он принимает на вход траектории СП и вычисляет необходимые управляющие сигналы для приводов, обеспечивая следование робота заданной траектории.

Система управления манипулятором взаимодействует с аппаратным интерфейсом через сокеты и протокол UDP. Функция write() передаёт задающие значения СП в плату управления, а функция read() считывает актуальные данные от платы управления, полученные с датчиков.

Взаимодействие с ros2_control реализовано через аппаратный интерфейс, включающий основные методы:

- read: считывает текущие положения СП робота и сохраняет их в переменной hw_state;
- echo: обновляет команды и значения СП на основе текущих положений;
- write: отправляет команды управления положением СП в hw_command.

Контроллер обрабатывает траекторию движения, заданную путевыми точками и временем достижения каждой из них. Для создания гладкого пути путевые точки интерполируются во времени с использованием кубических сплайнов. На основе интерполированных данных вычисляются команды управления для СП, включающие целевые положения, скорости или усилия. Эти команды передаются через аппаратный интерфейс приводам робота. Обратная связь о состоянии СП (положение, скорость, усилие) собирается для корректировки команд управления, обеспечивая точное и стабильное следование траектории.

Система управления мобильной платформой

Система управления мобильной платформой разработана на основе ROS 2 и интегрирует компоненты для обеспечения автономного движения и навигации робота. Основой системы является пакет SLAM Toolbox, работающий в асинхронном режиме, что позволяет в реальном времени строить карту окружающей среды и осуществлять одновременную локализацию робота с использованием данных лидара Velodyne VLP-16. Обработка данных с лидара осуществляется через последовательность узлов: драйвер собирает сырые данные, преобразующий узел учитывает калибровку и формирует облако точек, а затем генерируются данные типа LaserScan для дальнейшего использования в навигационных алгоритмах.

Навигационный стек Navigation2 [8] обеспечивает глобальное и локальное планирование пути, управление движением и обход препятствий. Узлы planner_server и controller_server отвечают за вычисление оптимальных траекторий и преобразование их в управляющие команды. Сглаживание траекторий выполняется узлом smoother_server для обеспечения плавности движения. Управление высокоуровневыми навигационными задачами и восстановлением после ошибок реализовано через узел bt_navigator, использующий деревья поведения.

Управление движением платформы осуществляется пользовательскими узлами trk211_controller и trk211_odometer. Первый отвечает за преобразование команд скоростей, получаемых от навигационного стека, в сигналы управления для приводов робота. Второй обрабатывает данные от энкодеров колес для определения текущего положения и скорости, предоставляя одометрическую информацию необходимую для навигации и управления.

Для координации команд управления используется узел twist_mux, который объединяет команды скоростей от системы автономной навигации и ручного управления, обеспечивая приоритетное распределение и предотвращая конфликты. Публикация состояния робота реализована через robot_state_publisher, использующий URDF-модель для передачи преобразований между различными системами координат, что обеспечивает корректную работу механизмов трансформации в ROS 2.

Система также поддерживает режим локализации на известной карте с использованием адаптивной фильтрации Монте-Карло (AMCL), что позволяет роботу ориентироваться в предварительно известной среде без необходимости повторного построения карты. Все компоненты системы интегрированы для обеспечения надежного и эффективного управления мобильной платформой, способной адаптироваться к динамическим изменениям окружающей среды и достаточно точно следовать заданным траекториям.

Архитектура системы автоматического захвата объектов

Архитектуру системы автоматического захвата объектов можно разделить на две основные части, программное обеспечение относящиеся к посту управления и к мобильному роботу.

Пост управления предназначен для запуска системы и наблюдения за действиями робота. Он состоит из человеко-машинного интерфейса (планшетный компьютер) и модуля связи. Человеко-машинный интерфейс предоставляет оператору возможность управлять МР, отслеживать его положение и ориентацию, а также получать информацию о состоянии системы в режиме реального времени. Модуль связи обеспечивает коммуникацию между постом управления и бортовыми средствами робота, используя стандартные протоколы передачи данных.

Бортовое оборудование мобильного робота обеспечивает автономное функционирование. Оборудование включает: модуль связи с постом управления, вычислительное устройство, камеру, лазерный дальномер, систему управления манипулятором и систему управления шасси. Вычислительное устройство Jetson Xavier NX (РТК-СИ) или ORIN (РТК-СПАМ) отвечает за обработку данных, получаемых от камеры и лазерного дальномера, а также за формирование целеуказаний для систем управления манипулятором и шасси.

Работа системы автоматического захвата объекта начинается с отправки команды запуска оператором. Команда передается через модуль связи на бортовые средства и поступает на вычислительное устройство, где активируется алгоритм локализации. Затем для получения видеопотока выбирается формат изображения на камере, после чего происходит его обработка на вычислительном устройстве и, в зависимости от активированной подсистемы, сгенерированное целеуказание отправляется в систему управления шасси или манипулятора. Оператор в режиме реального времени получает видеопоток с предсказанными данными, и информацией о состоянии мобильного робота, что позволяет ему осуществлять дополнительный контроль, если это необходимо. Структурно-функциональная схема автоматического захвата объектов представлена на рисунке 3.

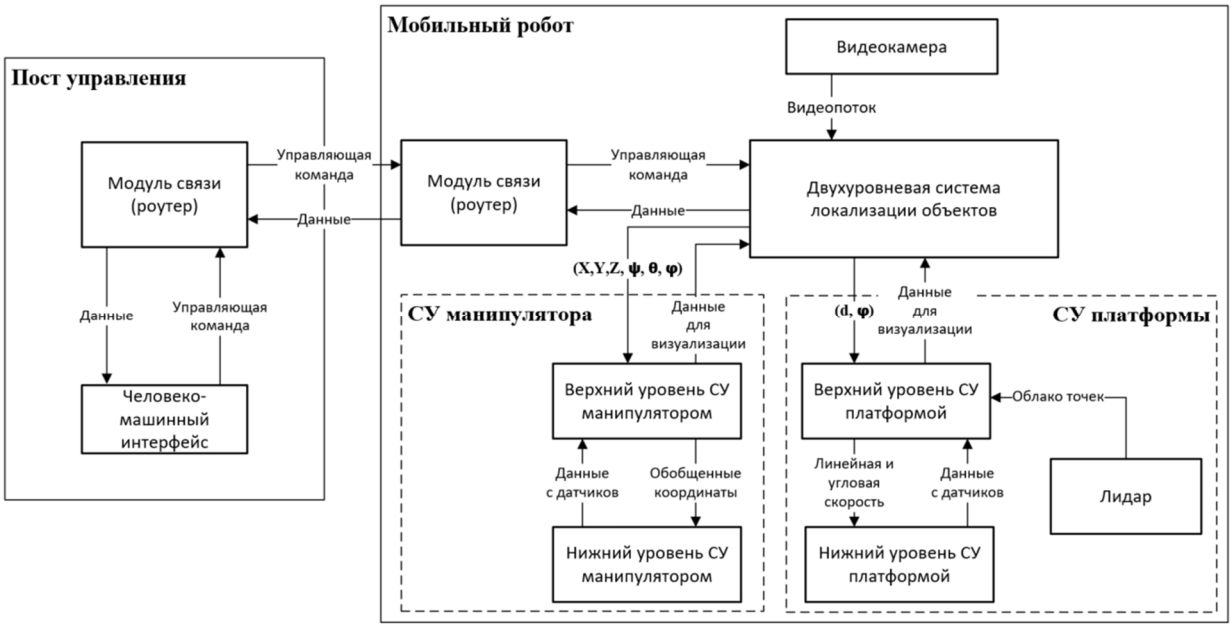


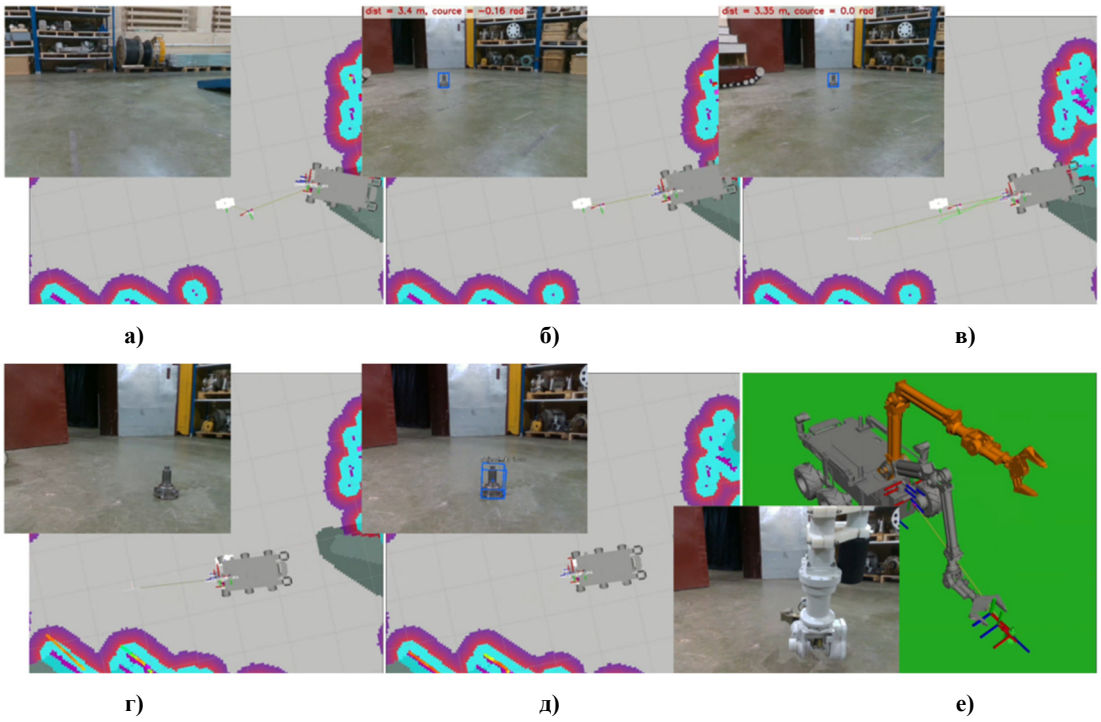
Рисунок 3 — Структурно функциональная схема автоматического захвата объектов

Система автоматического захвата объекта мобильным роботом

Полный цикл работы системы представлен на рисунке 4 для РТК-СПАМ и на рисунках 5 и 6 для РТК-СИ. При отправке команды на начало поиска и подбор заранее заданного объекта активируется подсистема определения дистанции и курса вместе с системой управления платформой (см. рис. 4а и 4б). После активации решается задача SLAM, и робот начинает вращаться на месте для поиска объекта. После обнаружения объекта происходит выравнивание платформы относительно него (см. рис. 4в). Затем данные об объекте (расстояния по осям z и x относительно камеры) передаются в Nav2, и платформа перемещается к объекту на расстояние 1,6 метра до него (см. рис. 4в и 4г). Далее активируется подсистема определения положения и ориентации для повторного выравнивания платформы относительно объекта (см. рис. 4д). Когда объект находится в центре изображения камеры, активируется система управления манипулятором (см. рис. 4е).

В систему управления манипулятором от подсистемы определения положения и ориентации поступает информация о положении и ориентации объекта относительно камеры. На основе этих данных формируется локальная система координат (ЛСК), связанная с объектом и две дополнительных ЛСК для его захвата (см. рис. 5а, 5б, 5в). Положение объекта отображается в виде ограничительного параллелепипеда на видеоизображении (см. рис. 5е). Когда ЛСК для захвата построены, система планирует движение в промежуточную точку

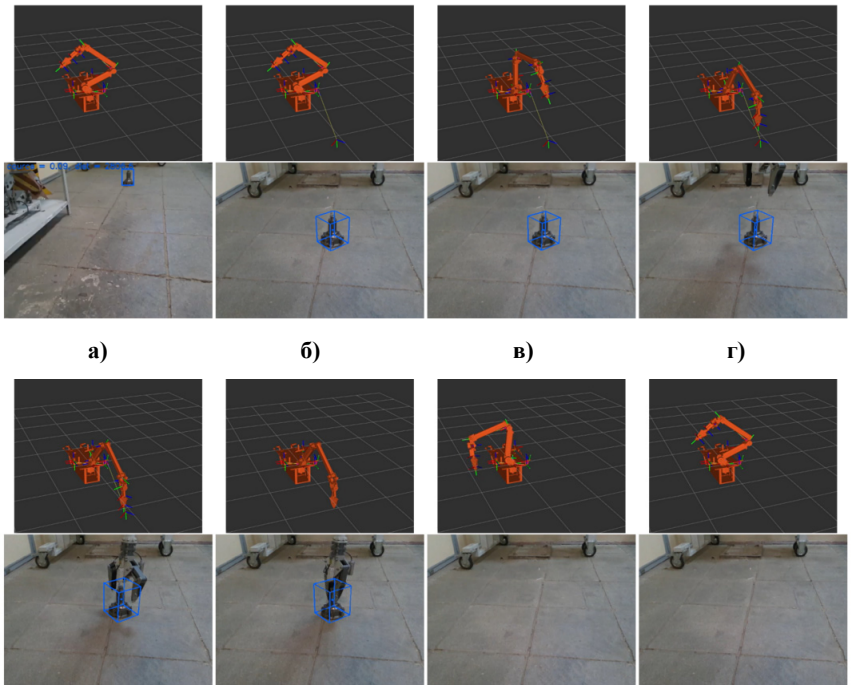
рядом с объектом, а затем в точку захвата (см. рис. 5в, 5г, 5д). После этого смыкаются губки схвата, и объект вместе с манипулятором возвращаются в предыдущую точку, а затем перемещаются в заранее заданное место (см. рис. 5е, 5ж, 5з).



а) б) в)

г) д) е)

Рисунок 4 — Проведение эксперимента по автоматическому захвату объекта манипулятором мобильного робота РТК-СПАМ (изображения, получаемые оператором)



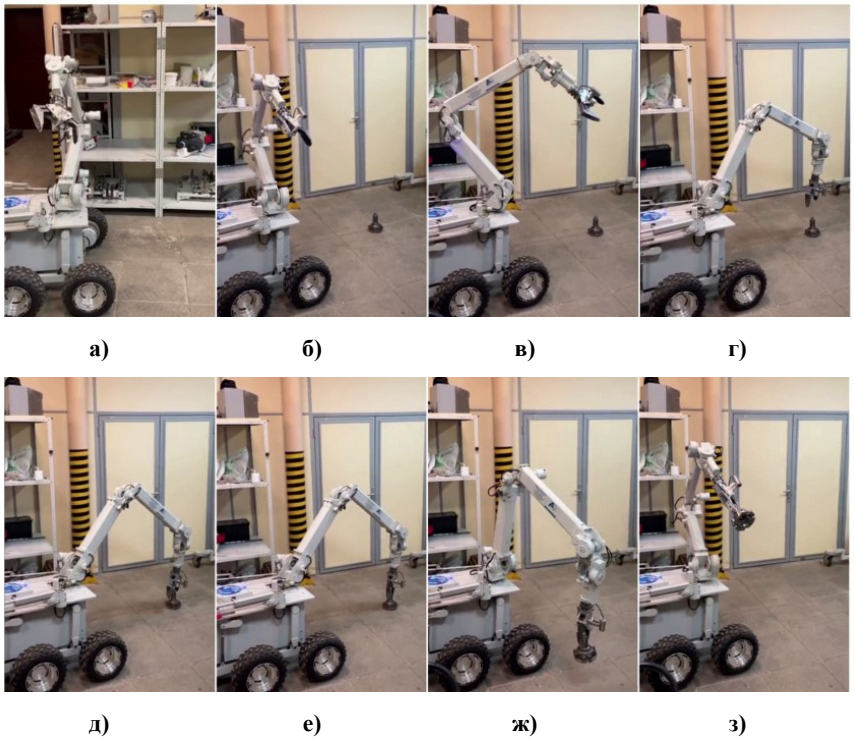
а) б) в) г)

д) е) ж) з)

Рисунок 5 — Проведение эксперимента по автоматическому захвату объекта манипулятором мобильного робота РТК-СИ (изображения, получаемые оператором)

Процесс, продемонстрированный на экране оператора на рисунке 5, показан сбоку на рисунке 6.

В результате экспериментальных исследований подтвердилась работоспособность представленной системы автоматического захвата с использованием манипулятора мобильного робота.



а) б) в) г)

д) е) ж) з)

Рисунок 6 — Проведение эксперимента по автоматическому захвату объекта манипулятором мобильного робота РТК-СИ

Заключение

В ходе проведенного исследования была успешно разработана и испытана система автоматического захвата объектов с использованием манипулятора мобильных роботов РТК-СИ и РТК-СПАМ. Система автоматического захвата включает несколько подсистем: двухуровневую подсистему локализации объектов по видеоизображению, подсистему управления манипулятором и подсистему управления мобильной платформой.

Важно отметить, что данный эксперимент продемонстрировал преимущества применения синтетических наборов данных при обучении глубоких сверточных нейронных сетей для задач компьютерного зрения.

Проведенные экспериментальные исследования подтвердили работоспособность разработанной системы автоматического захвата. Разработанная система обладает большим потенциалом для применения в широком спектре задач мобильной робототехники, включая промышленную автоматизацию, логистику и сервисные робототехнические системы.

Перспективы дальнейших исследований включают интеграцию дополнительных сенсорных систем для повышения точности локализации и ориентации, оптимизацию алгоритмов планирования траекторий и захвата, а также адаптацию системы для работы с различными типами манипуляторов и мобильных платформ. Это позволит расширить область применения разработанной системы и повысить ее эффективность в решении сложных задач робототехники.

Литература

1. Hodan T., Sundermeyer M., Matas J. BOP Challenge 2023 on Detection, Segmentation and Pose Estimation of Seen and Unseen Rigid Objects // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW 2024). — 2024. — DOI:10.1109/CVPRW63382.2024.00570.

2. Fang H.-S., Wang C., Gou M., Lu C. GraspNet-1Billion: A Large-Scale Benchmark for General Object Grasping // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2020). — 2020. — DOI:10.1109/CVPR42600.2020.01146.

3. Yenamandra S., Ramachandran A., Khanna M., et al. The HomeRobot Open Vocab Mobile Manipulation Challenge // Proceedings of the Thirty-seventh Conference on Neural Information Processing Systems: Competition Track. — 2023.

4. Собольников С.А., Куликов Н.А. Детектирование и оценка положения удаленных вертикально расположенных осесимметричных объектов роботом по видеоизображению // Вестник МГТУ «Станкин». — 2024. — № 1(68). — С. 27–35.

5. Bukschat Y., Vettre M. EfficientPose: An Efficient, Accurate and Scalable End-to-End 6D Multi-Object Pose Estimation [Электронный ресурс] // arXiv preprint arXiv:2011.04307. — 2020. — Режим доступа: https://arxiv.org/abs/2011.04307 (дата обращения: 01.08.2023).

6. Hinterstoisser S., et al. Model Based Training, Detection and Pose Estimation of Texture-Less 3D Objects in Heavily Cluttered Scenes // Computer Vision – ACCV 2012. — 2013. — Vol. 7724. — P. 548–562.
7. Denninger M., et al. BlenderProc [Электронный ресурс] // arXiv preprint arXiv:1911.01911. — 2019. — Режим доступа: https://arxiv.org/abs/1911.01911 (дата обращения: 01.08.2023).
8. Macenski S., Martín F., White R., Clavero J. The Marathon 2: A Navigation System // Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2020). — 2020. — DOI:10.1109/IROS45743.2020.9341202.

Информация об авторах

Собольников Сергей Александрович, к.т.н., начальник научно-исследовательской лаборатории, Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики имени Н. Л. Духова» (ФГУП ВНИИА), Россия, 127030, Москва, Сущевская ул., д. 22; доцент кафедры робототехники и мехатроники, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН» (ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»), Россия, Москва, 127055, Вадковский пер., д. 1, sasobolnikov@vniia.ru

Куликов Никита Андреевич, инженер-исследователь, ФГУП ВНИИА, Россия, 127030, Москва, Сущевская ул., д. 22; аспирант, ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», Россия, Москва, 127055, Вадковский пер., д. 1, nikita.kulikov.1302@yandex.ru

Подколзин Данил Денисович, инженер-исследователь, ФГУП ВНИИА, Россия, 127030, Москва, Сущевская ул., д. 22; аспирант, ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», Россия, Москва, 127055, Вадковский пер., д. 1, podkolzindanil@yandex.ru

Поиск технических решений для погрузочно-разгрузочных работ с применением роботизации

С.Г. Ласточкин
«Военная академия материально-технического обеспечения имени генерала армии А.В. Хрулёва» Министерства обороны Российской Федерации (ВА МТО), Санкт-Петербург, Россия, muromets86@internet.ru

Аннотация
В статье рассмотрены два направления роботизации погрузочно-разгрузочных работ. Первое направление – робот снаружи транспорта подвоза, второе – робототехнический комплекс внутри кузова транспортного средства. Предложены концепты робототехнических комплексов погрузочно-разгрузочных работ для обоих направлений. Рассмотрена возможность интеграции беспилотного летательного аппарата и искусственного интеллекта в робототехнический комплекс погрузочно-разгрузочных работ.

Ключевые слова
Погрузка, перегрузка, разгрузка, материальные средства, груз, тара, эффективность, робототехнический комплекс, роботизация погрузки, искусственный интеллект, беспилотный летательный аппарат.

Search for technical solutions for loading and unloading operations using robotics

Svjatoslav G. Lastochkin
«Military Academy of Logistics named after Army General A.V. Khrulev» of the Ministry of Defense of the Russian Federation (VA MTO), St. Petersburg, Russia, muromets86@internet.ru

Abstract
The article considers two directions of robotization of loading and unloading operations. The first direction is a robot outside the delivery vehicle, the second is a robotic complex inside the vehicle body. The concepts of robotic complexes of loading and unloading operations for both directions are proposed. The possibility of integrating an unmanned aerial vehicle and artificial intelligence into a robotic complex of loading and unloading operations is considered.

Key words
Loading, reloading, unloading, materials, cargo, packaging, efficiency, robotic complex, robotization of loading, artificial intelligence, unmanned aerial vehicle.

Вопрос роботизации подвоза материальных средств войскам в районах ведения боевых действий в настоящее время особенно актуален.

Подвоз материальных средств потребителю представляет собой комплекс мероприятий:

- подготовка материальных средств и транспорта;
- погрузка материальных средств;
- доставка материальных средств;
- перегрузка или выгрузка.

Все эти мероприятия проводятся в любых условиях обстановки (погоды, времени суток, времени года, в зоне радиоактивного заражения) и под воздействием внешних факторов, одним из которых является огневое воздействие противника различными средствами поражения.

Самым трудоемким и времязатратным, несомненно, является погрузка груза в транспорт подвоза.

Проблематика погрузочно-разгрузочных работ может включать в себя пять направлений:

- персонал (его наличие, количество, качество);
- оперативность работ (прямая зависимость от персонала);
- точность работ (оптимальная и рациональная загрузка транспорта);
- безопасность (персонала и материальных средств);
- сохранность материальных средств (аккуратность работ, возможность порчи и утраты материальных средств).

На временные показатели загрузки транспорта подвоза влияет ряд факторов:

- состояние персонала (наличие, опыт работы, слаженность действий, мотивация, психо-эмоциональное состояние, физические качества, состояние здоровья);
- время суток (день, ночь, сумерки);
- время года и погода (снег, гололёд, дождь, туман, сильный ветер);
- тара (вид, масса, состояние, наличие ручек, состояние маркировки для ее идентификации груза и определения допустимости совместной перевозки);

– расстояние подачи (от дверей склада или места перегрузки до кузова транспорта подвоза).

Для разрешения всех противоречий возникает потребность в снижении рисков и затрат. Необходимо сократить и сделать более стабильным показатель времени загрузки, а также повысить точность и рациональность использования площади и объемов под загрузку.

Одним из направлений повышения эффективности погрузочно-разгрузочных работ является применение передовых и инновационных технологий, в том числе роботизация процессов погрузки и разгрузки.

Цель работы: поиск новых технических решений для погрузочно-разгрузочных работ с применением роботизации.

Объект исследования – погрузочно-разгрузочные операции с унифицированной тарой и технические средства для реализации технологического процесса погрузки (разгрузки) груза в транспорт подвоза. В зависимости от обеспечивающего склада (склад инженерного имущества, продовольствия, вещевой, автомобильного имущества, горючего и др.) будет определена специфика тары и массо-габаритные характеристики груза в целом. Погрузка ящиков с материальными средствами с использованием робототехнических комплексов рассматривается двумя способами: штучно; в паллетах. При штучном способе загрузки тары с применением робототехнического комплекса ключевыми вопросами являются:

– максимальная масса одной единицы груза;
– максимальная грузоподъемность манипулятора робототехнического комплекса;
– специальный грузозахват под номенклатуру тары (ящиков).

Опыт показал, что тара используется не только штатная. Так же для транспортировки материальных средств применяется и приспособленная, изготовленная персоналом склада с привлечением подразделений. В связи с чем, необходимо рассматривать грузозахваты с возможностью расширения или сужения захватной части для нехарактерной тары.

В случае загрузки ящиков в паллетах, обращается внимание на следующих аспектах:

– повышаются грузоподъемные требования к робототехническому комплексу;
– необходимо устройство для придания таре (ящикам) устойчивости на паллете – специальное фиксирующее устройство;
– потребуется специальный грузозахват для фиксирующего устройства.

В работе рассматриваются два следующих способа роботизации погрузочно-разгрузочных работ:

– первый – внешний, при котором робототехнический комплекс снаружи транспорта подвоза (рис. 1, 2);
– второй – внутренний, где робототехнический комплекс внутри кузова транспорта подвоза.

Одним из вариантов реализации первого способа является автоматический 7-осевой робот загрузки и выгрузки самосвала [1], изображенный на рис 1.

Рисунок 1 — Загрузка ящиков с грузом в контейнер

Преимуществами первого способа по сравнению с загрузкой ручным способом и с применением средств малой механизации являются:

– большая грузоподъемность;
– робототехнический комплекс может работать дистанционно, что обеспечивает визуальную маскировку, сохранность жизни и здоровья оператора;
– робототехнический комплекс способен работать автономно, что обеспечит отсутствие демаскирующих признаков управления в радиочастотном диапазоне;
– загрузка и разгрузка возможна как от начала кузова и вглубь, так и наоборот;
– искусственный интеллект (система интеллектуальной поддержки принятия решения) обеспечит максимально рациональное использование площади кузова с учетом габаритов последнего и всех грузовых единиц, подлежащих загрузке (за счет их предварительной оценки и анализа с использованием компьютерного зрения [2], ситуационной видеоаналитики);
– возможно проведение погрузочно-разгрузочных работ в условиях вооруженного конфликта, в районах с повышенным радиационным фоном.

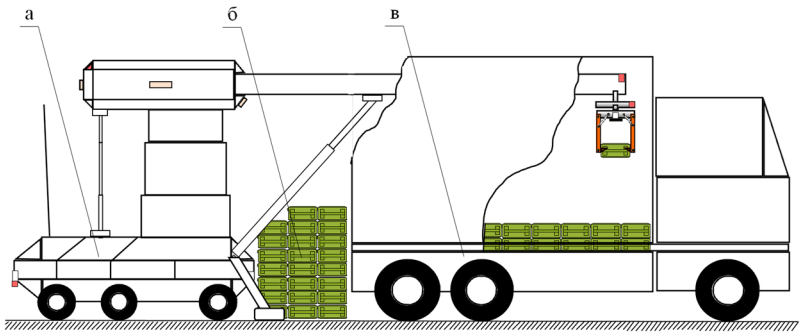


Рисунок 2 — Загрузка ящиков с грузом в кузов автомобиля с использованием робота-погрузчика: а – робототехнический комплекс погрузочно-разгрузочных работ, б – загружаемый груз, в – транспорт подвоза.

Кроме того, по сравнению со вторым способом имеется свобода перемещения. Главным недостатком первого способа является необходимость наличия робота-погрузчика как в пункте загрузки, так и в пункте выгрузки. Преимущества второго способа (робототехнический комплекс внутри кузова транспорта подвоза иллюстрирован на рис. 3, 4) в сравнении с загрузкой ручным способом и с применением средств малой механизации схожи с первым способом. Недостатком второго способа является ограниченная свобода перемещения.

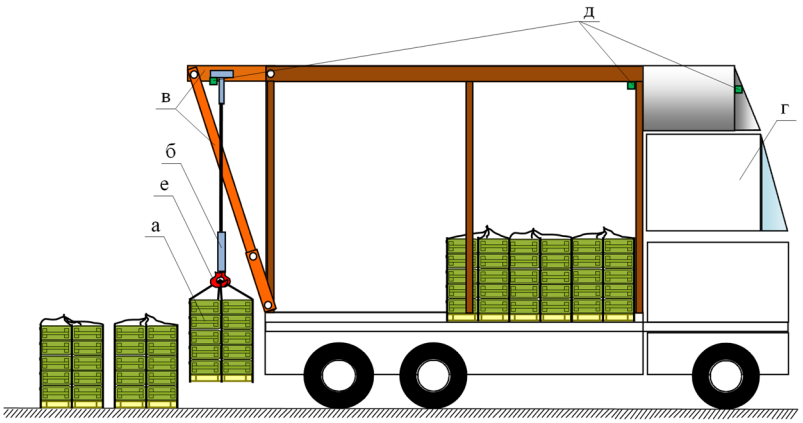


Рисунок 3 — Загрузка ящиков в кузов автомобиля с использованием робототехнического загрузчика (вид сбоку): а – загружаемый груз, б – грузоподъемное устройство, в – выдвижное (складное) устройство пневматическое для загрузки, г – транспорт подвоза, д – компьютерное зрение, е – электромагнитный клещевой захват

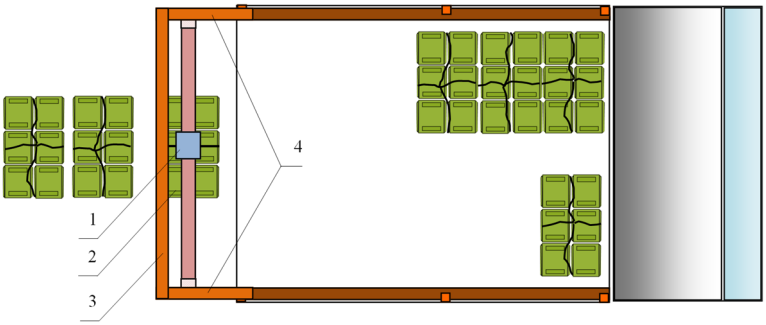


Рисунок 4 — Загрузка ящиков в кузов автомобиля (вид сверху): 1 – грузоподъемное устройство, 2 – груз, 3 – поперечная балка, 4 – продольные балки

Для повышения эффективности погрузочно-разгрузочного процесса можно интегрировать беспилотный летательный аппарат. Для этого необходимо применение современного, энергоэкономичного летательного аппарата вертикального взлета и посадки [3]. Это позволит более качественно контролировать выполнение работ в ходе погрузки и разгрузки, осуществлять мониторинг обстановки на километры вокруг места погрузки, перегрузки и разгрузки грузов. Вполне возможно, что робот погрузочных работ будет находиться на складе. Один из вариантов развертывания склада – полевой. Полевые склады в ходе ведения боевых действий являются важными объектами, разведка обстановки вокруг которых может повысить их живучесть.

Для оценки эффективности роботов-погрузчиков можно воспользоваться специальным программным обеспечением [4, 5]. Еще одной особенностью робототехнического комплекса погрузочных работ является возможность интеграции искусственного интеллекта. Компьютерное зрение может обеспечить идентификацию материальных средств по тары (маркировка, конфигурация), а интеллектуальная система поддержки принятия

решения рассчитает оптимальные варианты загрузки груза в кузов транспорта подвоза. Это будет более эффективно, если характера груза, его масса, центр масс и габариты считываются при погрузке. Будет рационально, если эти данные будут переданы робототехническому комплексу на следующем пункте перегрузки и так далее до конечной точки разгрузки.

С использованием искусственного интеллекта в робототехническом комплексе для погрузки возможна эффективная реализация способа автоматической идентификации объектов на основе RFID-меток. Такой подход обеспечит оперативность информации об актуальном статусе груза: ожидает загрузки, загружается, загружен, отправлен, прибыл на перегрузку в назначенный пункт, разгружается, разгружен, передан. Таким образом, применение роботизации погрузочно-разгрузочных работ является эффективным направлением.

Предложены концепты робототехнических комплексов для погрузочно-разгрузочных работ, которые могут быть рассмотрены для дальнейшего развития в данном направлении. Но перед внедрением робототехнических комплексов необходимо решить ряд вопросов. Какой груз загружать (его размеры, масса)? Робот нужен снаружи транспорта подвоза или внутри? На каком этапе погрузочно-разгрузочных работ требуется робот (погрузка, перегрузка, разгрузка или везде)?

Для применения системы поддержки принятия решения в робототехническом комплексе погрузочно-разгрузочных работ потребуется также решение проблемных вопросов. Такими могут быть:

– наличие и качество специальной маркировки груза – для качественной идентификации груза;
– разработка специального программного обеспечения, в котором будут заложены все варианты тары (ее конфигурация, массо-габаритные характеристики) и все известные варианты транспорта подвоза (его грузоподъемность, габаритные характеристики кузова и бортов);
– программное обеспечение для возможных нештатных и экстремальных ситуаций (поломка; выскальзывание, падение и опрокидывание разрядного груза; работа в условиях огневого воздействия противника и др.);
– возможность адаптации системы (на загружаемый груз массо-габаритные характеристики в базе данных отсутствуют; загружается транспорт, который не указан в базе данных);
– качественное компьютерное зрение (возможность его работы в разных условиях обстановки – дождь, снег, дым, ночь и др.).

Литература

1. Автоматический 7-осевой робот загрузки и выгрузки самосвала. Текст : электронный. Раздел сайта «Китай Производители, Поставщики и Товары – ru.Made-in-China.com», подраздел «Производительный и Обрабатывающий Механизм – Промышленный Робот – Паллетирующий робот». – URL: https://ru.made-in-china.com/co_senadvision/product_Automatic-7-Axis-Truck-Loading-and-Unloading-Robot_yugioyouyg.html (дата обращения: 13.09.2024).

2. ГОСТ Р 59385-2021. Информационные технологии. Искусственный интеллект. Ситуационная видеоаналитика. Термины и определения : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 5 марта 2021 г. № 120-ст : введен впервые : дата введения 2021-09-01 / Москва : Стандартинформ, 2021 – Текст : непосредственный.

3. Патент № 2825903 Российская Федерация, МПК B64C 29/00 (2006.01), B64C 27/08 (2006.01), B64C 27/28 (2006.01), H02J 7/02 (2006.01). Летательный аппарат вертикального взлета и посадки : № 2024101336 : заявл. 19.01.2024 : опубл. 02.09.2024 / Прудников В.Ю., Нечаев В.В., Куранов М.О., Ласточкин С.Г., Волков В.В. – 10 с .: ил. — Текст : непосредственный.

4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024613816 Российская Федерация. Программа расчета эффективности применения технических средств автоматизации, робототехнических комплексов с искусственным интеллектом в складских работах : № 2024611621 : заявл. 29.01.2024 : опубл. 15.02.2024 / С. Г. Ласточкин, В. Н. Ларионов, С. И. Келипов, А. В. Костюкович ; заявитель Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования «Военная академия материально-технического обеспечения имени генерала армии А.В. Хрулева» Министерства обороны Российской Федерации. – EDN ONOHJE.

5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024612602 Российская Федерация. Программа расчета эффективности применения робототехнических комплексов, беспилотных транспортных систем для обеспечения материально-техническими средствами : № 2024611576 : заявл. 29.01.2024 : опубл. 02.02.2024 / С. Г. Ласточкин, Д. П. Поправко, А. А. Николенко [и др.] ; заявитель Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования «Военная академия материально-технического обеспечения имени генерала армии А.В.Хрулева» Министерства обороны Российской Федерации. – EDN HSQUKH.

Информация об авторе

Ласточкин Святослав Геннадьевич, старший преподаватель, «Военная академия материально-технического обеспечения имени генерала армии А. В. Хрулёва» Министерства обороны Российской Федерации (ВА МТО), Россия, 199034, Санкт-Петербург, наб. Макарова, д. 8, muromets86@internet.ru

Проектирование захватного устройства с силовым очувствлением

Д.О. Дохов✉, Н.В. Заруцкий, Е.В. Касимцева
Государственный научный центр Российской Федерации «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики» (ГНЦ РФ ЦНИИ РТК), Санкт-Петербург, Россия, d.dohov@rtc.ru

Аннотация
Целью работы является разработка рабочего макета трёхпалого захватного устройства для работ в ограниченном пространстве. Для выполнения цели поставлены и решены следующие задачи: найдены компромиссные решения для сохранения малого габарита устройства при нужных усилиях и функциональности в условиях ограниченных пространств, проведён анализ развиваемых усилий, интегрировано силовое очувствление с обратной связью. В результате работы было разработано трёхпалое захватное устройство с силовым очувствлением и обратной связью для решения задач в ограниченном пространстве при дистанционном управлении оператором.

Ключевые слова
Дистанционное управление, кисть манипулятора, манипуляционная система, ограниченные пространства.

Благодарности
Результаты получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России 2024 года № 075-00697-24-01 1021051302301-9-2.2.2 «Разработка коллаборативного робота с ассистирующей двурукой антропоморфной манипуляционной системой для работы в пространствах малого объема» (FNRG-2022-0012).

Design of a force-sensing gripping device

Daniil O. Dokhov✉, Nikolay V. Zarutskii, Evgenia V. Kasimtseva
Russian state scientific center for robotics and technical cybernetics, St. Petersburg, Russia, d.dohov@rtc.ru

Abstract
The aim of the work is to develop a working layout of a three-fingered gripper device for work in a confined space. To achieve the goal, the following tasks were set and solved: compromise solutions were found to preserve the small size of the device with the necessary efforts and functionality in confined spaces, an analysis of the developed efforts was carried out, force sensitivity with feedback was integrated. As a result of the work a three-fingered gripper device with force sensitivity and feedback was developed to solve problems in a confined space with remote operator control.

Key words
Remote control, manipulator hand, manipulation system, limited space.

Acknowledgements
The results were obtained within the framework of the state task of Russian Ministry of Education and Science in 2024 № 075-00697-24-01 1021051302301-9-2.2.2 «Development of a collaborative robot with an assisting two-armed anthropomorphic manipulation system for working in small spaces» (FNRG-2022-0012).

Введение

Двурукие антропоморфные манипуляционные системы применяются как для решения общих задач, так и в сферах медицины, атомной и горнодобывающей промышленности и для выполнения различных сервисных действий. Целью применения таких роботов обычно является ассистирование в труднодоступных местах или минимизация присутствия человека во вредной, опасной или стерильной зонах работы.

Существует ряд задач, в решении которых двурукие системы имеют преимущества: манипуляция громоздким объектом манипулирования (далее – ОМ); ассистирование второй рукой, например, устранение препятствий; совместная манипуляция двумя ОМ, например, волочение, вставка или вкручивание ОМ друг в друга. В связи с этим была поставлена задача разработки алгоритмов управления двурукой антропоморфной манипуляционной системой (далее – АМС) для выполнения сложных технологических операций в условиях ограниченных пространств. Для этого, в том числе, был разработан макет АМС.

Особенностью тематики является работа в ограниченных пространствах, которая требует нетривиального подхода. Это связано с габаритами захватного устройства (далее – ЗУ) и с подходами к процессу захвата ОМ. Примерами ограниченного пространства являются заполненные транспортные контейнеры, сумки, ниши.

Распространённой задачей и основной, которую мы будем рассматривать, является перемещение и извлечение бытовых предметов из заполненной сумки. Такая задача вызывает одну из наибольших сложностей и разнообразность дополнительных требований для решения с помощью АМС, в то время как человек без затруднений решает её голыми руками.

Для решения поставленных задач были найдены компромиссные решения и спроектировано трёхпальцевое ЗУ.

Одной из проблем при работе в ограниченном пространстве является блокирование обзора камеры препятствиями или даже самим ЗУ. Для облегчения работы в условиях непрямой видимости в ЗУ было реализовано силовое очувствление, которое позволяет как ощупывать пространство вслепую, так и деликатно захватывать ОМ, имеющие разнообразные свойства, передавая ощущения оператору по обратной связи.

Технические требования к макету АМС

Пространства, классифицируемые как ограниченные, и предметы в них имеют соразмерность с человеческой рукой. Так, например, сторону ограниченного пространства предлагается принять не более чем в 1,5 раза превышающей размер кисти [1], а ОМ, в том числе бытовые, размерами до 10 см. Такие объекты редко превышают массу 5 кг.

Таким образом, макет АМС должен обеспечивать выполнение сложных технологических операций в условиях ограниченных пространств. Антропоморфный манипулятор в составе макета АМС должен обеспечивать возможность перенести груз массой не менее 5 кг. ЗУ должно обеспечивать величину раскрытия губок не менее 0,1 м.

Помимо этого, для выполнения задач, в которых предполагается применение ЗУ, добавление силового очувствления и обратной связи по нему повысит надёжность выполнения операций.

Состав макета АМС

Так как макет АМС предполагает дистанционное управление, было решено разделить его на задающую и исполнительную системы (рис. 1).

Рисунок 1 — Проектный облик

В качестве исполнительной части выступает двурукий робот с копирующим управлением и стереокамерой. В качестве задающей части выступают оператор, органы управления в виде перчаток с вибромоторами обратной связи и очки виртуальной реальности.

Такая система позволяет создать эффект погружения для оператора, а наличие двух манипуляторов – увеличить универсальность в применении к задачам в ограниченных пространствах. Оператор сможет действовать манипуляторами схожим образом как со своими руками, получая обратную связь в виде вибрации и стереоскопического изображения, создающего ощущение объёма наблюдаемых объектов.

Компоновка ЗУ

Учитывая специфику задачи и ранее обозначенные требования, можно сделать вывод, что человеческая кисть для их решения подходит лучше всего. Соответственно, ЗУ с возможностями и габаритами, приближёнными к человеческим, будет наиболее востребовано.

При рассмотрении функциональных возможностей человеческой кисти было обнаружено, что её можно представить как устройство с 22 степенями свободы [2, с.1991], по 4 на палец и 2 на запястье (рис. 2).

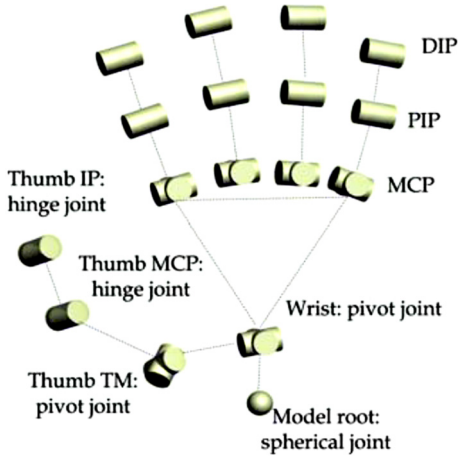


Рисунок 2 — Структура человеческой кисти [2, с.1991]

Очевидно, что в рамках габарита, соизмеримого с человеческим, сохранив необходимую грузоподъёмность, обеспечить все степени приводами затруднительно, так как приводы занимают тем больше габарита, чем они больше по количеству и мощности.

В рамках работы разработано ЗУ (рис. 3), включающее в себя компромиссное решение об уменьшении количества пальцев до трёх и приводных фаланг до двух, при сохранении возможности отведения большого пальца.

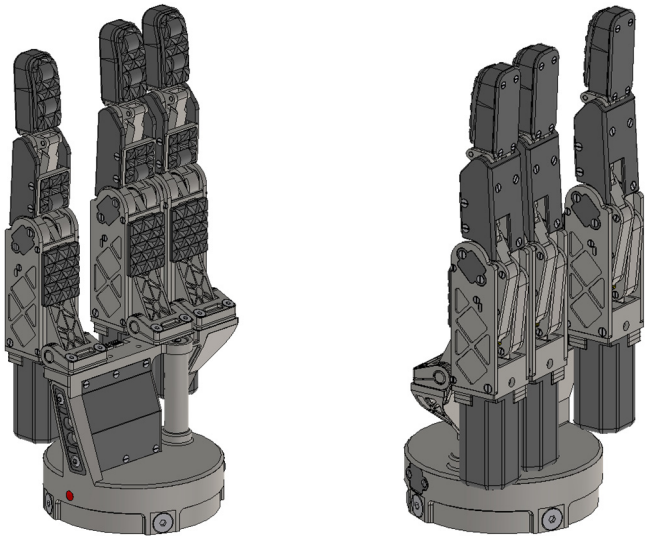


Рисунок 3 — Внешний вид ЗУ

Такая схема требует всего 7 приводов и всё еще достаточна для выполнения большинства операций, что будет показано далее, а также позволяет использовать более мощные приводы в том же габарите, что позволит зажимать и поднимать силами трения ОМ из самых неудобных положений.

Возможности ЗУ

Отличительной особенностью ЗУ является возможность свести большой палец так, чтобы все три пальца могли симметрично зажать цилиндр, что обеспечит его соосность с основанием ЗУ (рис. 4). Это позволит вращать основание ЗУ и выкручивать ОМ без перехвата – только вращением манипулятора. Это очень полезно для манипуляций с резьбовыми соединениями и инструментами.

Функция разворота большого пальца в плоскость остальных даёт еще одну полезную особенность, а именно возможность протиснуть ладонь в узкое пространство между ОМ для более качественного воздействия на них в условиях ограниченного пространства.

Также для ЗУ есть возможность ручной настройки первичного наклона пальцев (рис. 5).

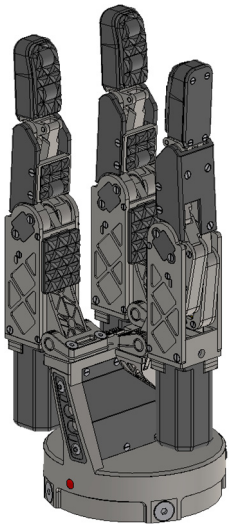


Рисунок 4 — Внешний вид ЗУ со сведённым большим пальцем

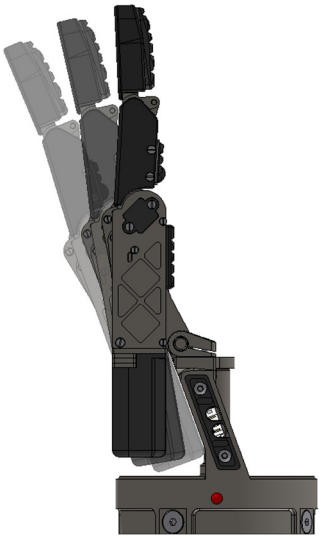


Рисунок 5 — Первичный наклон пальцев ЗУ

Предварительная настройка наклона пальца позволяет подготовится к захвату особо больших ОМ.

Обе заложенные особенности расширяют возможности ЗУ в процессах взаимодействия с ОМ, при этом не увеличивая, а в случае с большим пальцем в определенных конфигурациях даже сокращая габарит устройства.

Палец ЗУ

Палец ЗУ имеет два привода, отвечающие за среднюю и дистальную фаланги соответственно. Эта особенность позволяет управлять ими независимо, добиваясь более подходящих конфигураций при захвате ОМ и повышая адаптивность под оператора при дистанционном управлении. Важным фактором при проектировании пальца ЗУ является возможность развивать усилие на его кончике больше 30Н (рис. 6, 7). Это необходимо для захвата тремя пальцами ОМ массой до 5 кг при помощи сил трения.

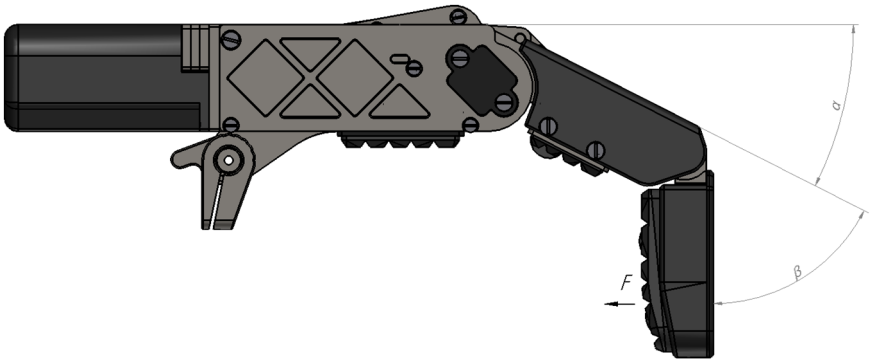


Рисунок 6 — Схема углов при расчёте усилий на кончике пальца ЗУ

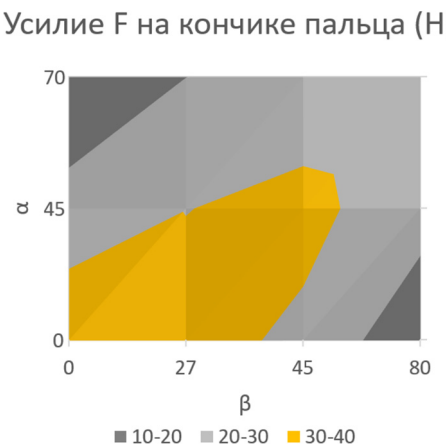


Рисунок 7 — Усилие на кончике пальца ЗУ

Палец спроектирован таким образом, чтобы работать в двух режимах: удерживающем и поддерживающем. Удерживающий режим развивает большие усилия на кончике пальца при меньших углах фаланг и позволяет захватить ОМ из неудобного положения силами трения. Поддерживающий режим развивает меньше усилий при больших углах фаланг и позволяет захватывать ОМ за счёт прочности конструкции корпуса, опирая ОМ на него. Разделение на два режима относительно углов, в том числе, позволило сохранить малый габарит пальца, не теряя его функциональности.

Объекты манипулирования

Во время проектирования было важно ориентироваться на ОМ, которые в теории может понадобится захватить. Исходя из технических требований можно понять массу и размеры ОМ. Кроме того, ОМ обладают другими важными характеристиками: форма и жёсткость [3]. В качестве примера в таблице 1 приведены ОМ, которые встречаются в человеческом багаже подходящего под определение ограниченного пространства малого объёма.

Таблица 1 — Объекты манипулирования

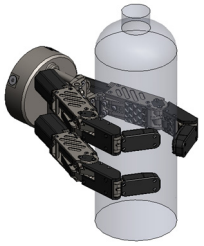
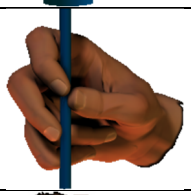
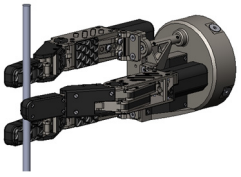
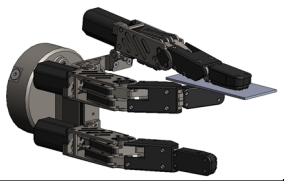
ОМ	Масса, г	Размер, мм	Форма [3]	Жёсткость [3]
Пластиковая бутылка молока 1 литр	1030	Ø85x250	Цилиндр	Сжимаемый
Стеклянная бутылка газировки 1 литр	1000	Ø85x250	Цилиндр	Жёсткий, хрупкий
Запаянный пакет молока 1 литр	1030	150x100x45	Низкий эллипс	Сжимаемый, гибкий
Запаянный пакет гречки	900	180x100x55	Низкий эллипс	Сжимаемый, гибкий
Стопка бумаг	2500	297x210x52	Низкая призма	Гибкий
Коробка для хранения	2000	100x100x60	Низкая призма	Жёсткий
Аккумулятор для ИБП	2000	100x100x60	Низкая призма	Жёсткий
Книга	1500	210x150x30	Низкая призма	Жёсткий
Карандаш	3	Ø7x180	Цилиндр	Жёсткий

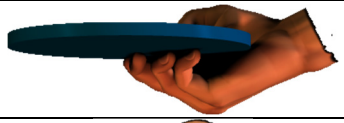
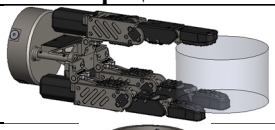
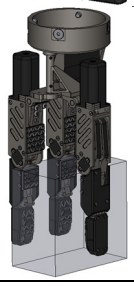
ЗУ было спроектировано таким образом, чтобы захватить наибольшую номенклатуру ОМ. Такой подход позволил увеличить универсальность устройства, а также учесть хрупкость ОМ посредством добавления силового очувствления.

Типы хватов

Разные по характеристикам ОМ удобно захватывать разными конфигурациями хвата. Исходя из полученных характеристик ОМ наиболее интересными типами хватов, изложенных в таксономии [4] выглядят № 3, № 8, № 16, № 18, № 22 (см. табл. 2). Они попадают под категорию хватов, использующих как режим удержания за счёт сил трения, так и режим поддержки, использующий упор на ладонь без применения большой силы сжатия. Также в таблицу 2 были добавлены изображения аналогичного хвата с помощью ЗУ.

Таблица 2 — Примеры хватов

Название	Иллюстрация из GRASP [2]	Иллюстрация ЗУ АМС
Medium Wrap (№3)		
Prismatic 2 Finger (№8)		
Lateral (№16)		

Название	Иллюстрация из GRASP [2]	Иллюстрация ЗУ АМС
Extension Type (№18)		
Parallel Extension (№22)		

Был проведён анализ, который показал, что рассматриваемое ЗУ АМС в теории может покрыть до 72,7% типов хватов, изложенных в таксономии [4].

Силовое очувствление

На фалангах пальца расположены упругие подушечки с барометрическим датчиком внутри (рис. 8). Датчик, будучи залитым упругим материалом, воспринимает давление на подушечку и передаёт его на вибромоторы управляющей перчатки оператора в качестве обратной связи.

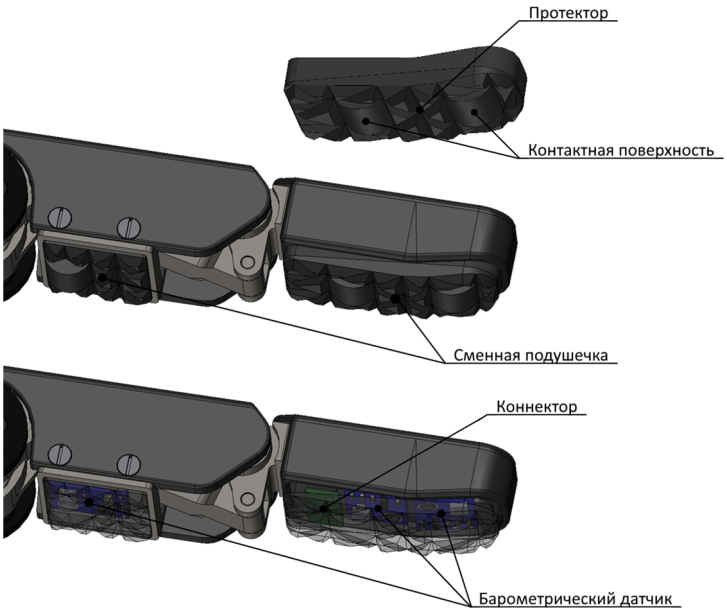


Рисунок 8 — Силовое очувствление пальца

Наличие силового очувствления позволяет оператору проводить операции более деликатно, не допуская разрушения хрупких предметов. Подушечки выполнены сменными и имеют удобный коннектор, что позволяет выбрать наиболее подходящую форму под конкретную операцию. В представленном на рисунке 8 варианте имеется протектор и контактные поверхности для лучшего ощупывания и определения вектора усилия.

Заключение

В рамках работы были найдены компромиссные решения для сохранения размеров устройства, соразмерными с человеческой рукой, при требуемых усилиях и функциональности в условиях ограниченных пространств. Также проведён анализ развиваемых усилий и разработаны различные режимы захвата объекта манипулирования. Для возможности работы без прямой видимости объекта, а также для более деликатного обращения с хрупкими объектами при дистанционном управлении оператором было интегрировано силовое очувствление с обратной связью на органы управления макетом.

Достигнута цель работы – разработан рабочий макет трёхпалого захватного устройства для работ в ограниченном пространстве с широкой номенклатурой возможных объектов манипулирования и покрытием большинства антропоморфных хватов, что повышает универсальность устройства при работе из неудобных положений.

Литература

1. Дохов Д. О. Проблемы создания манипуляционных систем для пространства малого объема / Д. О. Дохов, А. Н. Тимофеев. — Текст : непосредственный // Наука и бизнес: пути развития. — 2023. — № 12(150). — С. 97-103.

2. P. Cerveri, E. De Momi, N. Lopomo, G. Baud-Bovy, R. M. L. Barros and G. Ferrigno, «Finger Kinematic Modeling and Real-Time Hand Motion Estimation», in Annals of Biomedical Engineering, vol. 35, no. 11, pp. 1989–2002, Nov. 2007, doi:10.1007/s10439-007-9364-0.

3. T. Feix, I. M. Bullock and A. M. Dollar, «Analysis of Human Grasping Behavior: Object Characteristics and Grasp Type», in IEEE Transactions on Haptics, vol. 7, no. 3, pp. 311-323, 1 July-Sept. 2014, doi: 10.1109/TOH.2014.2326871.

4. T. Feix, J. Romero, H. -B. Schmiedmayer, A. M. Dollar and D. Kragic, «The GRASP Taxonomy of Human Grasp Types», in IEEE Transactions on Human-Machine Systems, vol. 46, no. 1, pp. 66-77, Feb. 2016, doi: 10.1109/THMS.2015.2470657.

Информация об авторах

Дохов Даниил Олегович, конструктор, Государственный научный центр Российской Федерации «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики» (ГНЦ РФ ЦНИИ РТК), Россия, 194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 21, d.dohov@rtc.ru

Заруцкий Николай Владимирович, начальник отдела, ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Россия, 194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 21, zarutskiy@rtc.ru

Касимцева Евгения Викторовна, конструктор, ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Россия, 194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 21, e.kasimtseva@rtc.ru

Оценивание параметров трения в шагающих многозвенных роботах методом динамического расширения регрессора и смешивания

Н.В. Михальков✉, А.А. Пыркин
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО» (Университет ИТМО), Санкт-Петербург, Россия, nvmikhalkov@itmo.ru

Аннотация
В статье предложен метод адаптивного оценивания параметров трения для многозвенных шагающих роботов. Актуальность подхода обусловлена необходимостью учитывать изменения параметров трения в суставах, вызванные, например, температурными колебаниями и износом. Представленный подход, использующий метод динамического расширения регрессора и смешивания (DREM), а также особенности движения шаговым способом, позволяет достичь устойчивой оценки параметров трения, избегая вычислительных сложностей и потребности в дополнительных датчиках, как это было в традиционных методах. Моделирование на примере семизвенной роботизированной системы показало сходимость оценок к истинным значениям даже в условиях шумов и задержек.

Ключевые слова
Метод динамического расширения регрессора и смешивания, шагающие роботы, оценка параметров трения.

Благодарности
Работа поддержана Министерством науки и высшего образования РФ (паспорт госзадания № 2019-0898).

Adaptive estimation of friction parameters in multilink legged robots using the dynamic regressor extension and mixing

Nikita V. Mikhalkov✉, Anton A. Pyrkin
ITMO University (ITMO), St. Petersburg, Russia, nvmikhalkov@itmo.ru

Abstract
This paper presents a method for adaptive friction parameter estimation in multilink legged robots. The relevance of this approach lies in the need to account for changes in joint friction parameters due to factors such as temperature fluctuations and wear. The proposed method, based on the dynamic regressor extension and mixing (DREM) technique and leveraging the specifics of legged motion, enables stable friction parameter estimation while avoiding computational complexities and the need for additional sensors, as seen in traditional methods. Simulation on a seven-link robotic system demonstrated convergence of the estimates to true values, even in the presence of noise and delays.

Key words
Adaptive parameter estimation, legged robots, friction parameter estimation.

Acknowledgements
The «Acknowledgments» section contains information on the financial support of the research (funding organization, grant or project number, etc.).

В настоящее время одни из самых распространенных и эффективных подходов к управлению шагающими роботами основываются на априорной полной информации о динамике модели, т.е. использующие модельно-предиктивный подход. Среди наиболее значимых работ можно выделить [1], [2], в которых исследуется подходы к построению управления для робота-квадрупеда на основе упрощенной и полной модели, соответственно. В работе [3] представлено применение алгоритма движения двуногого робота, использующего оптимизацию траектории на основе динамики модели робота. Несмотря на широкий потенциал возможностей применения этих и схожих алгоритмов для управления роботами, в большинстве случаев точками их приложения роботы с прямой передачей крутящего момента привода на подвижное звено, либо квазипрямые варианты трансмиссии (с суммарным передаточным числом <10). Предпосылки именно к такому выбору основываются на необходимости использования модели привода и системы передачи в составе общей модели робота в виде:

$$\tau = r \cdot K_T \cdot i \ ,$$

где r – передаточное число, K_T – моментная константа мотора, i – подаваемая контроллеру мотора команда на привод, τ – производимый момент. Альтернативой такому подходу к созданию шагающих многозвенных

роботов может служить применение в сочленениях робота приводов с обратной связью по создаваемому крутящему моменту, как, например, в роботе Anymal [4].

Однако, в общей динамической модели робота достаточно сложно учесть такие факторы, как нелинейности механической системы, а также неточности массо-инерционных характеристик элементов конструкций. В то же время массо-инерционные характеристики остаются практически неизменными в процессе эксплуатации робототехнической конструкции, тогда как параметры трения в суставах могут меняться как вследствие износа, так и в зависимости от температуры окружающей среды. По этой причине интерес представляют алгоритмы адаптивного оценивания параметров в применении к проблеме трения.

Несмотря на достаточно высокую степень проработанности методов оценивания параметров трения для роботов-манипуляторов разного типа [5, 6, 7], тема оценивания трения в шагающих роботах не так сильно освещена в научной литературе. Например, в работе [8] применяется метод оценивания с использованием дифференциальной геометрии, позволяющий оценить массы и инерции структурных элементов робота, а также потенциально оценивать силы трения по модели кулона без использования информации о силах реакции опоры, однако метод не предполагает адаптации к изменяющимся параметрам. В работе [9] для выполнения оценки сил трения в двуногом шагающем роботе используется дополнительных датчик силы реакции в опоре, за счет которого можно произвести оценку трения в суставах, соответствующих сочленениям опорной ноги робота.

Упомянутые выше подходы позволяют произвести оценку основных параметров в системе, в том числе трения по модели Кулона, однако их недостатком является их вычислительная сложность и неадаптивность по отношению к возможным изменениям параметров в процессе управления, а также использование дополнительных датчиков. Так, в частности, могут происходить температурные изменения значений вязкого трения в подшипниках суставов робота, что в свою очередь может приводить к существенным нарушениям в движении.

В данной работы мы применяем адаптивный алгоритм оценивания, известный как метод динамического расширения и смешивания регрессора, для получения оценки значений сил трения в суставах робота применительно к шагающим роботам.

Описание

Так как конструкции шагающих роботов могут существенным образом варьироваться, и количество конечностей робота, одновременно находящихся в контакте с поверхностью движения, могут различаться в том числе и в зависимости от алгоритма смены фаз опоры и переноса для каждой конкретной ноги, то целесообразным является использовать для описания динамики робота т.н. плавающую или подвижную базу.

Описание динамики роботов с плавающей базой отличается от описания роботов с жестко закрепленной базой за счет дополнительных неактуируемых степеней свободы, таким образом, вектор обобщенных координат робота $q \in \mathbb{R}^n$, где n – общее количество степеней свободы, имеет вид:

$$q = \begin{bmatrix} q_f \\ q_j \end{bmatrix}, \tag{1}$$

где $q_f \in \mathbb{R}^m$ – координаты неактуируемых степеней свободы, $q_j \in \mathbb{R}^{n-m}$ – координаты актуируемых степеней свободы.

Уравнения движения робота с плавающей базой могут быть представлены с помощью уравнения жесткого манипуляторам с n степенями свободы с учетом диссипативных сил в суставах:

$$\mathbf{M}(q)\ddot{q} + \mathbf{C}(q,\dot{q})\dot{\mathrm{q}} + g(q) = \boldsymbol{S}^{\mathrm{T}}\tau_{\mathrm{joint}} - \boldsymbol{S}^{\mathrm{T}}\tau_{\mathrm{loss}} + \boldsymbol{J_C}^{T}\lambda, \tag{2}$$

где $\mathbf{M}(q) \in \mathbb{R}^{n\times n}$ – матрица инерции, $q \in \mathbb{R}^n$ – вектор обобщенных координат робота, $\mathbf{C}(q,\dot{q})\dot{q}$ – вектор кориолисовых и центробежных сил, $g(q)$ – вектор сил тяжести, τ_{joint} – вектор обобщенных сил, создаваемых актуаторами, τ_{loss} – вектор диссипативных сил в сочленениях, $\boldsymbol{J_C} \in \mathbb{R}^{k\times n}$ – якобиан линейно независимых k кинематических ограничений, $\lambda \in \mathbb{R}^k$ – вектор сил реакции, $\boldsymbol{S} \in \mathbb{R}^{(n-m)\times n}$ – матрица выбора $(n-m)$ актуируемых координат.

Под кинематическими ограничениями подразумеваются точки в пространстве, в которых прикладываются внешние силы, действующие на робота и отсутствует движение по отношению к глобальной системе отсчета. Такие ограничения могут быть выражены как

$$\dot{x}_c = \boldsymbol{J_C}\dot{q} = 0 \tag{3}$$

$$\ddot{x}_c = \boldsymbol{J_C}\ddot{q} + \dot{\boldsymbol{J}}_c\dot{q} = 0\,, \tag{4}$$

где $x_c, \dot{x}_c, \ddot{x}_c$ описывают положение, скорости, и ускорения точки, неподвижной относительно глобальной системы координат.

Далее будем считать, что $\boldsymbol{J_C}$ и λ описывают линейно независимые кинематические ограничения.

В качестве диссипативных сил в работе рассматриваются силы сухого и вязкого трения в шарнирах робота. Момент силы трения будем рассматривать в кулоновском приближении:

$$\tau_{\text{loss}} = \mathbf{D}\dot{\mathrm{q}} + \mathbf{F}(\dot{\mathrm{q}}), \tag{5}$$

где $\mathbf{D} \triangleq diag\{\mathrm{d}_1, .., \mathrm{d}_n\}$ – матрица коэффициентов вязкого трения, $\mathbf{F}(\dot{\mathrm{q}}) \triangleq diag\{\mathrm{f}_1, .., \mathrm{f}_n\} \cdot sign(\dot{q})$ – вектор сил сухого трения в шарнирах.

Прямое измерение сил реакции λ опорных ног и факта осуществления касания поверхности шагающим роботом является сложно реализуемым на практике, так как датчики касания и очувствления редко присутствуют в конструкции робота, а существующие варианты реализации [10] обладают достаточно высокими показателями шумов измерения, невысокой полосой пропускания и, как следствие, существенной фазовой задержкой измерения. Таким образом, будем предполагать, что компонента ${J_C}^T\lambda$ в уравнении (2) не может быть определена. Для дальнейших математических преобразований будем считать, что координаты актуируемых сочленений q_j соответствует следующему порядку:

$$q_j = \begin{bmatrix} q_c \\ q_u \end{bmatrix}, \tag{6}$$

где q_c и q_u соответствуют координатам, входящим и невходящим в кинематические ограничения (3), (4).

Далее воспользуемся QR-разложением матрицы кинематических ограничений [11]:

$${J_c}^{\mathrm{T}} = \boldsymbol{Q}\begin{bmatrix} \boldsymbol{R} \\ 0 \end{bmatrix}, \tag{7}$$

где $\boldsymbol{Q}$ – ортогональная матрица ($\boldsymbol{Q} = \boldsymbol{Q^T}$), $\boldsymbol{R}$ – верхнетреугольная матрица. Дополнительно, если $\boldsymbol{R}$ определена таким образом, чтобы иметь только положительные элементы на главной диагонали, то такое разложение является единственным. Введем дополнительные матрицы $\boldsymbol{S_u}$ и $\boldsymbol{S_c}$ следующего вида:

$$\begin{matrix} \boldsymbol{S_c} = [\boldsymbol{I}_{k\times k} \quad 0_{k\times(n-k)}] \\ \boldsymbol{S_u} = [0_{(n-k)\times k} \quad \boldsymbol{I}_{(n-k)\times(n-k)}]' \end{matrix} \tag{8}$$

являющиеся матрицами селекции координат входящих и исключенных из кинематических ограничений соответственно.

Умножим обе части уравнения (1) на матрицу $\boldsymbol{Q^T}$.

$$\begin{cases} \boldsymbol{S_c Q}^T\left(\mathbf{M}\ddot{q} + \mathbf{C}\dot{q} + \mathrm{g}(q)\right) = \boldsymbol{S_c Q}^T\boldsymbol{S}^T\left(\tau_{joint} - \tau_{\text{loss}}\right) + \boldsymbol{Q}^T\boldsymbol{Q}\boldsymbol{R}\lambda \\ \boldsymbol{S_u Q}^T\left(\mathbf{M}\ddot{q} + \mathbf{C}\dot{q} + \mathrm{g}(q)\right) = \boldsymbol{S_u Q}^T\boldsymbol{S}^T\left(\tau_{joint} - \tau_{\text{loss}}\right) \end{cases} \tag{9}$$

И используем свойство ортогональных матриц ($\boldsymbol{Q\,Q^T} = \boldsymbol{Q^T Q} = \boldsymbol{I}$), получим следующие уравнения.

$$\boldsymbol{S_c Q}^T\left(\mathbf{M}\ddot{q} + \mathbf{C}\dot{q} + \mathrm{g}(q)\right) = \boldsymbol{S_c Q}^T\boldsymbol{S}^T\left(\tau_{joint} - \tau_{\text{loss}}\right) + \boldsymbol{R}\lambda \tag{10}$$

$$\boldsymbol{S_u Q}^T\left(\mathbf{M}\ddot{q} + \mathbf{C}\dot{q} + \mathrm{g}(q)\right) = \boldsymbol{S_u Q}^T\boldsymbol{S}^T\left(\tau_{joint} - \tau_{\text{loss}}\right) \tag{11}$$

Согласно [12] уравнения (10,11) являются независимыми, если движение робота осуществляется без нарушения уравнений кинематических ограничений (3), (4). Таким образом оба уравнения описывают поведение модели целиком. Для дальнейшего построения важно отметить, что за счет выбора координат (6) матрица $\boldsymbol{Q}$ будет представлять собой квадратную матрицу, состоящую из квадратной подматрицы $\mathbb{R}^{k\times k}$ и $(n-k)$ единичных векторов. Таким образом, для координат q_u уравнение (2) можно свести к следующему выражению:

$$\mathbf{M}_{\boldsymbol{u}}(q)\ddot{q}_u + \mathbf{C}_{\boldsymbol{u}}(q,\dot{q})\dot{q}_u + \mathrm{g}_u(q) = \tau_{\mathrm{u}} - \tau_{u_{\text{loss}}} \tag{12}$$

где $\mathbf{M}_{\boldsymbol{u}}(q)$, $\mathbf{C}_{\boldsymbol{u}}(q,\dot{q})\dot{q}_u$, $\mathrm{g}_u(q)$, $\tau_{u_{\text{loss}}}$ – редуцированные компоненты исходного уравнения (2), соответствующие координатам робота для звеньев, не входящих в кинематические ограничения. Этот результат означает, что, пользуясь цикличностью движений шагающего робота, возможно реализовать алгоритм оценивания параметров трения с остановкой, например, по циклу, представленному на рисунке 1.

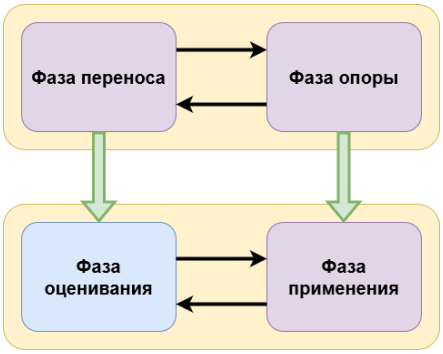


Рисунок 1 — Предлагаемый цикл для обеспечения оценки трения

Для формулирования задачи регрессии, выполним следующую замену переменных в (12):

$$\mathcal{Y}_u(q,\dot{q},\ddot{q}) := \tau_u - \mathbf{M}_{\boldsymbol{u}}(q)\ddot{q}_u + \mathbf{C}_{\boldsymbol{u}}(q,\dot{q})\dot{q}_u + \mathrm{g}_u(q), \quad (13)$$

где $\mathcal{Y}_u(q,\dot{q},\ddot{q}) \in \mathbb{R}^{(n-k)\times(n-k)}$ – регрессор.

Таким образом, для переносимой ноги можно представить (12) как набор линейных регрессионных уравнений (ЛРУ) для каждого сочленения i:

$$\mathcal{Y}_i(q,\dot{q},\ddot{q}) = \varphi_i{}^T\theta_i\,, \quad (14)$$

где $\theta_i \triangleq [\mathrm{d}_i \quad \mathrm{f}_i]^{\mathrm{T}}$ – вектор неизвестных параметров, $\varphi_i \triangleq [\dot{q}_i \quad \mathrm{sign}(\dot{q}_i)]^{\mathrm{T}}$ – регрессор.

Как можно отметить, (13) включает в себя неизмеримую переменную $\ddot{q}$. Для того, чтобы избавиться от нее, в полученном регрессионном уравнении введем линейный оператор $\widehat{H}[.] := \frac{\lambda}{p+\lambda}$, где $p \equiv \frac{d}{dt}$, $\lambda \in R^+$, и применим его к (14):

$$\widehat{H}[\mathcal{Y}_i(q,\dot{q},\ddot{q})] = \widehat{H}[\varphi_i{}^T]\theta_i$$

В таком случае, для каждого сустава переносимой части робота с индексом i получим:

$$\frac{\lambda}{p+\lambda}\tau_i - \frac{\lambda}{p+\lambda}\left[\mathbf{M}_{i,:}(q)\ddot{q}\right] - \frac{\lambda}{p+\lambda}\left[\mathbf{C}_{i,:}(q,\dot{q})\dot{q}\right] - \frac{\lambda}{p+\lambda}[\mathrm{g}_i(q)] = \frac{\lambda}{p+\lambda}[\varphi_i{}^T]\theta_i\,, \quad (15)$$

где $\mathbf{M}_{i,:}(q)$, $\mathbf{C}_{i,:}(q,\dot{q})$, $\mathrm{g}_i(q)$ – соответствующие строчки $\mathbf{M}_{\boldsymbol{u}}(q)$, $\mathbf{C}_{\boldsymbol{u}}(q,\dot{q})$, $\mathrm{g}_u(q)$ с индексом i.

Далее используем лемму о замене [13], с учетом выбранного фильтра принимающую вид:

$$\frac{\lambda}{p+\lambda}[x^T y] = x^T\frac{\lambda}{p+\lambda}y - \frac{1}{p+\lambda}\left[\frac{\lambda}{p+\lambda}[y^T]\dot{x}\right]$$

где $x,\ y \in \mathbb{R}^k$. Получаем, что компонента $\frac{\lambda}{p+\lambda}\left[\mathbf{M}_{i,:}(q)\ddot{q}\right]$ в уравнении (15) примет следующую форму:

$$\frac{\lambda}{p+\lambda}\left[\mathbf{M}_{i,:}(q)p\dot{q}\right] = \mathbf{M}_{i,:}(q)\frac{\lambda p}{p+\lambda}\dot{q} - \frac{1}{p+\lambda}\left[\dot{\mathbf{M}}_{i,:}(q,\dot{q})\frac{\lambda p}{p+\lambda}\dot{q}\right]. \quad (16)$$

В уравнении (16) отсутствует неизмеримая переменная $\ddot{q}$, но в то же время присутствует компонента $\dot{\mathbf{M}}_{i,:}(q,\dot{q})$, которая также может быть вычислена, используя известное условие кососимметричности матрицы $\dot{\mathbf{M}}(q,\dot{q}) - \mathbf{2C}(q,\dot{q})$.

Таким образом, уравнение (15) принимает вид следующей регрессионной задачи:

$$\tilde{\mathcal{Y}}_i(q,\dot{q}) = \widehat{H}[\varphi_i{}^T]\theta_i, \quad (17)$$

где $\tilde{\mathcal{Y}}_i(q,\dot{q}) := \widehat{H}[\mathcal{Y}_i(q,\dot{q},\ddot{q})]$ с учетом (16).

Так как для широкого множества движений робота возможны условия нарушения постоянного возбуждения регрессора [14]:

$$\forall t > 0, \exists\delta > 0, T > 0 : \int_t^{t+T}\varphi(s)\varphi(s)^T\,ds \geq \delta\boldsymbol{I}, \quad (18)$$

где $\boldsymbol{I}$ – единичная матрица, то асимптотическая сходимость ошибки оценивания в задаче (17) не может быть гарантирована при помощи стандартных методов, применяемых для таких задач, например, градиентного спуска. Для ослабления условия (18) возможно использовать другие методы, например, метод динамического расширения и смешивания регрессора [15].

Метод состоит из следующих последовательных шагов, схематически представленных на рисунке 2:

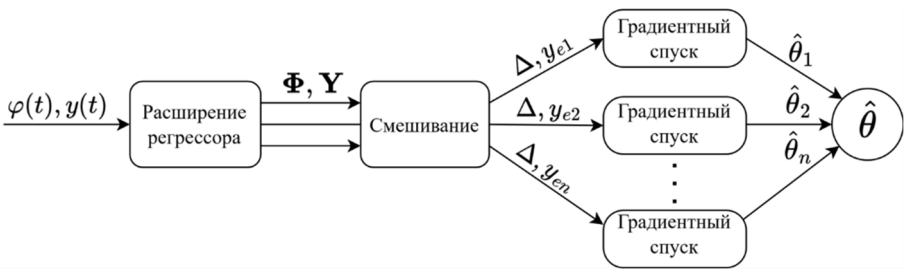


Рисунок 2 — Принципиальная схема алгоритма DREM

1. Построение расширенного регрессора $\boldsymbol{\Phi}(t) \equiv \boldsymbol{\Phi} \in \mathbb{R}^{n\times n}$ с помощью поочередного применения к регрессионному уравнению (17) линейных устойчивых операторов, либо используя альтернативные схемы расширения.

2. Умножение обеих частей уравнения на союзную матрицу расширенного регрессора $adj(\boldsymbol{\Phi})$ и используя ее свойство:

$$adj(\boldsymbol{\Phi})\boldsymbol{\Phi} = |\boldsymbol{\Phi}|I_n;$$

для приведения исходного линейного регрессионного уравнения к набору скалярных регрессионных уравнений относительно исходных параметров регрессии;

3. Полученные в результате скалярные регрессионные уравнения разрешаются для получения оценки посредством градиентного спуска или альтернативных подходов.

Удобство подхода заключается также в том, что настройка алгоритмов оценки неизвестных параметров, полученных на шаге 2 может осуществляться независимо от других параметров исходной линейной регрессии.

Также отметим, что одной из наиболее простых для настройки вариаций алгоритма DREM является подход, использующий расширение Крессельмейера [16] на шаге 1:

$$\begin{matrix} \dot{\boldsymbol{Y}}(t) = -l\boldsymbol{Y}(t) + \boldsymbol{\varphi}(t)y(t),\ \boldsymbol{Y}(t_0) = 0_n \\ \dot{\boldsymbol{\Phi}}(t) = -l\boldsymbol{\Phi}(t) + \boldsymbol{\varphi}(t)\boldsymbol{\varphi}^{\mathrm{T}}(t),\ \boldsymbol{\Phi}(t_0) = \mathbf{0}_{n\times n} \end{matrix}, \quad (19)$$

где $l \in \mathbb{R}^+$ – настраиваемый параметр.

Реализация подхода

Для проверки реализуемости подхода была разработана модель робота в среде Simulink. Модель представляет собой плоский пятизвенник на неподвижном основании с прикрепленным к нему двузвенным манипулятором (визуализация модели представлена на рис. 3). Подвижная база такой модели имеет три степени свободы: две поступательных и одну вращательную.

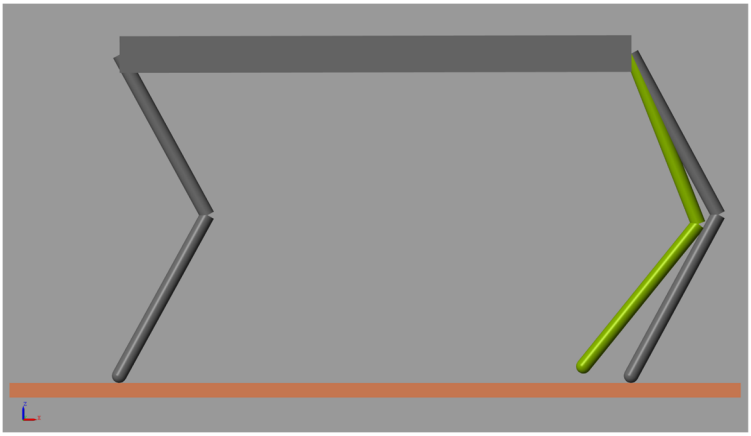


Рисунок 3 — Визуализация рассмотренной структуры робота; зеленым цветом в модели выделена конечность робота в состоянии переноса

Параметры модели представлены в таблице 1. Для построения управления на основе полученных ранее уравнений, была использована псевдо-инверсия в уравнении (11) совместно PD-регулятором:

$$\tau_{joint} = (\boldsymbol{S_u Q}^T \boldsymbol{S}^T)^+ \boldsymbol{S_u Q}^T \left(\mathbf{M}\ddot{q}_{\boldsymbol{des}} + \mathbf{C}\dot{q} + \mathrm{g}(q)\right) + \boldsymbol{K_p}\left(q_{j_{\mathrm{des}}} - q_j\right) + \boldsymbol{K}_d\left(\dot{q}_{j_{\mathrm{des}}} - \dot{q}_j\right), \quad (20)$$

где $\boldsymbol{K_p}$ и $\boldsymbol{K}_d$ – матрицы коэффициентов пропорциональности, $q_{j_{\mathrm{des}}}$, $\dot{q}_{j_{\mathrm{des}}}$– желаемые положения и скорости актуируемых суставов.

В качестве целевого движения для рабочего органа манипулятора в уравнении (20) была выбрана траектория, представленная на рисунке 4. Красным цветом на рисунке выделен участок траектории, в котором мы предполагаем возможным взаимодействие с подстилающей поверхностью и, соответственно, приостановку работы алгоритма оценивания. Для остальных степеней свободы в качестве задания использовалось удержание текущего положения ($\dot{q}_{j_{\mathrm{des}}}, \ddot{q}_{\boldsymbol{des}} = \mathbf{0}$). Дополнительно в каждом сочленении робота было задано трение, параметры которого также представлены в таблице 1.

Также для алгоритма оценивания были введены модельные неточности. Была задана ошибка исполнения команды в виде равномерно распределённой случайной величины (р.р.с.в.) с амплитудой 0.2 Н·м, добавлен шум показаний скорости в виде р.р.с.в. с амплитудой 0.02 рад/с, а также задержка обратной связи величиной 0.005 с. Шаг решателя модели составил 0.001 с; параметр фильтрации в выражении (15) взят со значением $\lambda = 100$.

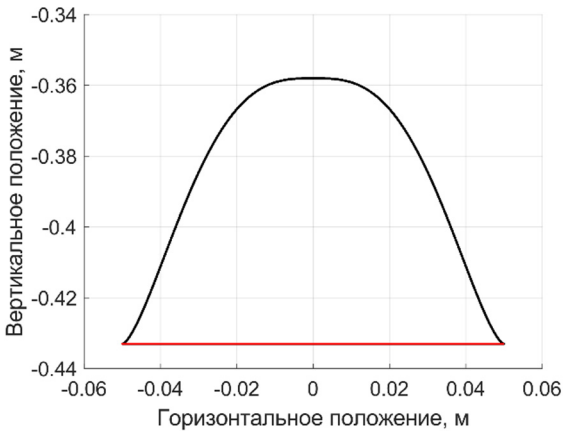


Рисунок 4 — Траектория движения рабочего органа манипулятора; период движения составлял 1 с.

Таблица 1 — Параметры модели, использованные для симуляции

Параметр	Верхнее звено	Нижнее звено	Корпус
Длина звена, м	0.25	0.25	0.35
Масса звена, кг	1.0	1.0	10
Момент инерции звена, кг·м^2	0.1	0.05	0.25
Сухое трение в шарнире, Н·м	1.0	1.0	–
Вязкое трение в шарнире, Н·м/(рад/с)	0.5	0.5	–

По результатам работы алгоритма оценивания с применением схемы расширения (19) с $l = 0.96$ получены оценки параметров трения в верхнем (рис. 5а, 5б) и нижнем (рис. 6а, 6б) суставах переносимой ноги робота.

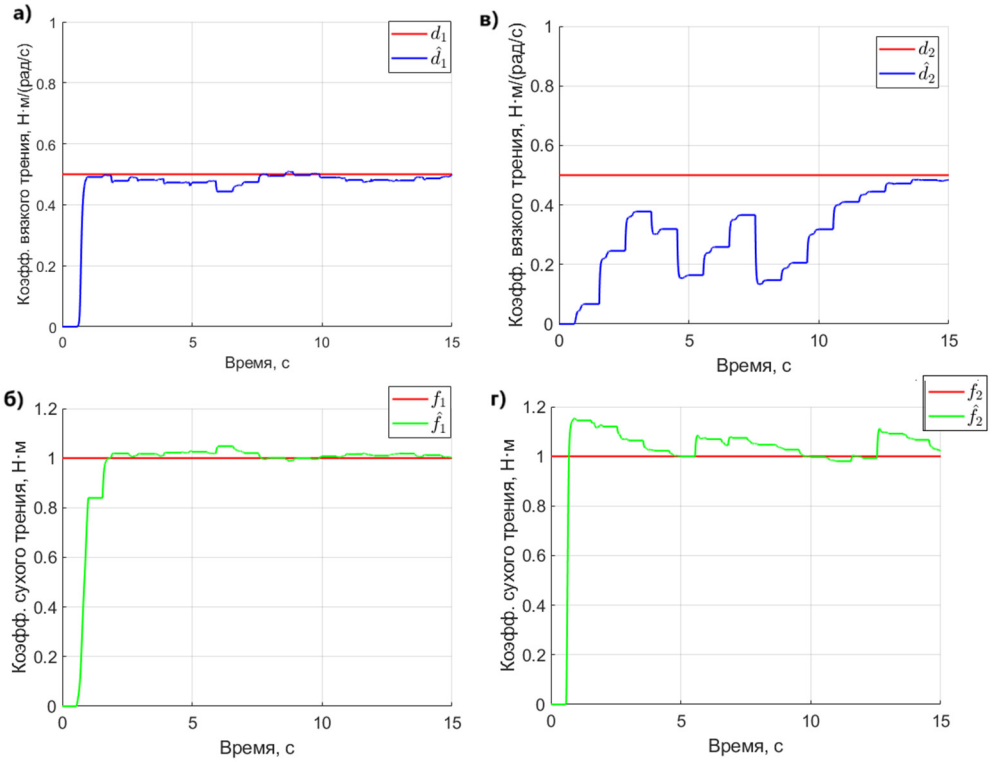


Рисунок 5 — Результат оценки коэффициентов трения

Паттерны скоростей каждого звена представлены на рисунке 7а (поступательные скорости корпуса), 7б (угловые скорости корпуса и звеньев опорных ног), 7в (скорости сочленений переносимой ноги); сформированные команды управления для ног в состоянии опоры и переносимой ноги представлены на рисунках 8а и 8б соответственно. На рисунках видно, что несмотря на разрывность процесса оценивания, оценки параметров сходится к истинным значениям за время симуляции (до 15 секунд).

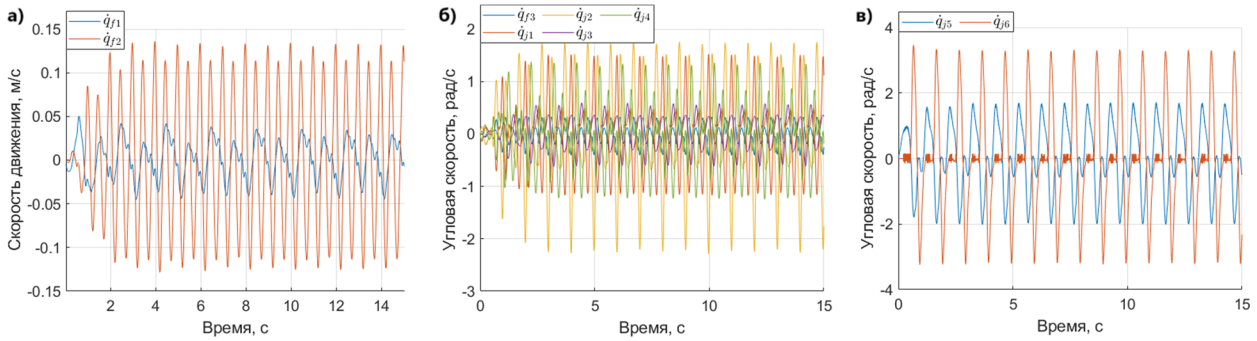


Рисунок 6 — Скорости корпуса и звеньев робота

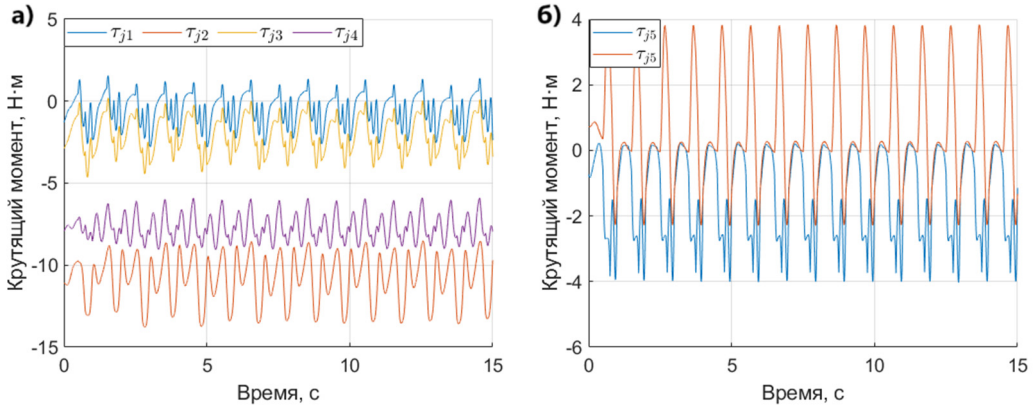


Рисунок 7 — Команды управления звеньями

Заключение

Предложенный метод оценки параметров трения по модели Кулона в шарнирах многозвенных шагающих роботов доказал свою реализуемость, даже при условии разрывности оценочной процедуры. По результатам моделирования на семизвенной роботизированной системе была достигнута сходимость оценки параметров к истинным значениям за 15 секунд, несмотря на наличие измерительного шума и задержки. Применение метода динамического расширения регрессора с использованием схемы Крессельмейера для расширения регрессора упростило настройку алгоритма адаптивной оценки параметров, что позволяет более эффективно настраивать модель в многозвенных шагающих роботах.

Литература

1. Bledt G., Wensing P. M., Kim S. Policy-regularized model predictive control to stabilize diverse quadrupedal gaits for the MIT cheetah // 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). – IEEE, 2017. – С. 4102-4109.
2. Gaertner M., Bjelonic M., Farshidian F., Hutter M. Collision-free MPC for legged robots in static and dynamic scenes // 2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). – IEEE, 2021. – С. 8266-8272.
3. Gong Y., Hartley R., Da X., Hereid A., Harib O., Huang J. K., Grizzle J. Feedback control of a Cassie bipedal robot: Walking, standing, and riding a Segway // 2019 American Control Conference (ACC). – IEEE, 2019. – С. 4559-4566.
4. Hutter M., Gehring C., Jud D., Lauber A., Bellicoso C. D., Tsounis V., Hwangbo J., Bodie K., Fankhauser P., Bloesch M., Diethelm R. ANYmal – a highly mobile and dynamic quadrupedal robot // 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). – IEEE, 2016. – С. 38-44.
5. Bittencourt A. C., Wernholt E., Sander-Tavallaey S., Brogårdh T. An extended friction model to capture load and temperature effects in robot joints // 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. – IEEE, 2010. – С. 6161-6167.
6. Jin M., Kang S. H., Chang P. H. Robust compliant motion control of robot with nonlinear friction using time-delay estimation // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2008. – Т. 55, №1. – С. 258-269.
7. Dong J., Xu J., Zhou Q., Zhu J., Yu L. Dynamic identification of industrial robot based on nonlinear friction model and LS-SOS algorithm // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2021. – Т. 70. – С. 1-12.
8. Lee T., Wensing P. M., Park F. C. Geometric robot dynamic identification: A convex programming approach // IEEE Transactions on Robotics. – 2020. – Т. 36, №2. – С. 348-365. – doi: 10.1109/TRO.2019.2926491.
9. Hashlamon I., Erbatur K. Joint friction estimation for walking bipeds // Robotica. – 2016. – Т. 34, №7. – С. 1610-1629.

10. Yabu S., Shimizu K., Morita M., Kawashima N., Yoshikawa M. Estimation of Ground Reaction Force Using Carbon Insoles with Piezoelectric Film Sensors and Force Sensing Resistors // 2023 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC). – IEEE, 2023. – С. 4355-4360.
11. Kim S. S., Vanderploeg M. J. QR decomposition for state space representation of constrained mechanical dynamic systems. – 1986. – С. 183-188.
12. Mistry M., Buchli J., Schaal S. Inverse dynamics control of floating base systems using orthogonal decomposition // 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation. – IEEE, 2010. – С. 3406-3412.
13. Morse A. Global stability of parameter-adaptive control systems // IEEE Transactions on Automatic Control. – 1980. – Т. 25, №3. – С. 433-439.
14. Ljung L. System Identification – Theory for the User. 2nd Edn. – Upper Saddle River, NJ: PTR Prentice Hall, 1999.
15. Aranovskiy S., Bobtsov A., Ortega R., Pyrkin A. Performance enhancement of parameter estimators via dynamic regressor extension and mixing // IEEE Transactions on Automatic Control. – 2016. – Т. 62, №7. – С. 3546–3550.
16. Korotina M., Aranovskiy S., Ushirobira R., Vedyakov A. On parameter tuning and convergence properties of the DREM procedure // 2020 European Control Conference (ECC). – IEEE, 2020. – С. 53-58.

Информация об авторах

Михальков Никита Владимирович, аспирант, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО» (Университет ИТМО), Россия, 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49, лит. А, nvmikhalkov@itmo.ru

Пыркин Антон Александрович, профессор, д.т.н., декан, профессор, в.н.с., Университет ИТМО, Россия, 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49, лит. А, pyrkin@itmo.ru, ORCID: 0000-0001-8806-4057

Управление с использованием скользящего режима для мобильной платформы в экстремальных условиях

Ч.А. Фам[1]✉, С.И. Неделчев[1,2]
[1]*Автономная некоммерческая организация высшего образования «Университет Иннополис», г. Иннополис, Россия, c.fam@innopolis.university*
[2]*ПАО «Сбербанк», Центр Робототехники, Москва, Россия*

Аннотация
В статье представлен алгоритм управления для мобильной платформы, предназначенный для надежной работы в экстремальных условиях и устойчивый к неопределенности параметров системы. Предложенный алгоритм управления основывается на использование скользящего режима, обеспечивающего устойчивость и сходимость системы. Оценка эффективности разработанного подхода выполнена с помощью компьютерного моделирования. Результаты симуляции демонстрируют эффективность алгоритма при наличии внешнего возмущения и параметрической неопределенности.

Ключевые слова
Робастное управление, управление скользящим режимом, поверхность скольжения, форма регрессора, экстремальные условия.

Sliding mode control for mobile platforms in extreme environments

Cham An Fam[1]✉, Simeon I. Nedelchev[1,2]
[1]*Autonomous noncommercial organization of higher education «Innopolis University», Innopolis, Russia, c.fam@innopolis.university*
[2]*PJSC «Sberbank», Robotics Center, Moscow, Russia*

Abstract
The paper presents a control algorithm for a mobile platform designed for reliable operation in extreme conditions and resistant to uncertainty of system parameters. The proposed control algorithm is based on the use of a sliding mode, which ensures stability and convergence of the system. The effectiveness of the developed approach is assessed using computer modeling. The simulation results demonstrate the effectiveness of the algorithm in the presence of external disturbance and parametric uncertainty.

Key words
Robust control, sliding mode control, sliding surface, regressor form, extreme conditions.

Введение

Управление нелинейными системами является важной областью изучения в теории управления [1], [2]. Применение существующих методов линеаризации часто оказывается недостаточно эффективным, так как многие нелинейные эффекты остаются неучтенными, что может привести к непредсказуемому поведению системы. Классические алгоритмы управления обычно требуют точных значений параметров системы и отсутствия неопределенности. Однако в реальных условиях эти предположения редко выполняются, что существенно ограничивает применимость таких алгоритмов для решения практических задач. Особенно это актуально для работы системы в экстремальных условиях, таких как сильный ветер, неровности рельефа, резкие вибрации, механические нагрузки. Синтез надежного алгоритма управления, способного работать в таких условиях, является чрезвычайно важной задачей. К алгоритмам управления нелинейными системами относится робастное управление, при котором обеспечивается устойчивость и эффективность системы в условиях неопределённостей и внешних возмущений. Робастное управление применимо в случаях, когда неизвестны точные значения параметров системы и внешних воздействий, однако известны граничные значения этих величин. Также в нелинейных системах используется адаптивное управление, когда параметры системы изменяются в течение времени. В отличие от робастного управления, которое полагается на заранее заложенные пределы неопределённостей, адаптивное управление использует механизмы для динамической оценки и подстройки параметров системы в реальном времени. Это позволяет системе «обучаться»и подстраиваться под изменяющиеся условия.

В современной практике существует тенденция интегрировать методы нелинейного управления с оптимизационными подходами. К ним относятся Model Predictive Control [3], Control Lyapunov Functions [4], Control Barrier Functions [5]. Совмещение этих методов позволяет создать не только устойчивые, но и безопасные системы управления. Однако, для реализации требуются большие вычислительные ресурсы и глубокое понимание в области теории управления и численных методов.

Неопределенность можно условно разделить на два типа: параметрическая неопределенность, которая возникает вследствие изменения массы при выполнении определенной операции (например, транспортировка груза, работа манипулятора с объектами различной массы [6]), и немоделированная неопределенность. К немоделированным неопределенностям относятся воздействия, которые нельзя точно предсказать или учесть в модели системы. К ним относятся внешние возмущения (сильный ветер, изменяющиеся погодные условия) и внутренние нелинейности (изменения в трении).

Для удобства анализа неопределенности в данной работе динамическая модель, описанная в виде уравнения Эйлера-Лагранжа, в силу линейности системы к параметрам системы представляется в регрессионной форме. К преимуществам данного представления относятся: легкость интегрирования с робастным управлением, упрощение расчета и синтеза управления, возможность представления параметрической неопределенности в явном виде.

В данной работе разработан алгоритм управления мобильной платформой, обеспечивающий надежное функционирование в экстремальных условиях. Кроме того, синтезированный алгоритм управления работает при наличии неопределенности в параметрах системы. Оценка результатов алгоритма произведена посредством симуляции, что позволит оценить его поведение и производительность в заданных условиях.

Динамическая модель

Динамика системы описывается системой нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) второго порядка вида:

$$M(q)\ddot{q} + h(q,\dot{q}) = u$$

где $q, \dot{q}, \ddot{q}$ – обобщенные координаты, скорости и ускорения, соответственно, $M(q) \in R_{n\times n}$ – положительно определенная матрица инерции, $h(q,\dot{q}) \in R_n$ включает кориолисовы и гравитационные эффекты, u – входное управление.

Представление динамики системы в форме регрессора выглядит следующим образом:

$$Y(q,\dot{q},\ddot{q})p = u$$

где $Y(q,\dot{q},\ddot{q})$ – матрица регрессора, а p – вектор параметров, δp – часть управления, которая противодействует неопределенности в системе.

В данной работе используется робастное управление с использованием скользящего режима. Суть данного метода заключается в том, чтобы привести систему из определенного начального состояния к так называемой скользящей поверхности. Достигнув этой поверхности, система способна «скользить» вдоль нее к устойчивому состоянию даже при наличии параметрических неопределенностей и внешних воздействий. Однако, у данного метода есть один недостаток, который заключается в наличии дребезжания. Этот эффект возникает, когда управление переключается с высокой частотой между разными состояниями для компенсации неопределенности. Дребезжание может привести к таким нежелательным последствиям как износ механических компонентов, шум и вибрация, снижения энергоэффективности системы. Чтобы уменьшить эффект дребезжания и смягчить управление, можно ввести пограничный слой (boundary layer), однако это также может снизить точность и производительность управления.

Определим скользящую переменную, связанную с ошибкой в положении (разность между текущей и желаемой положением) и скорости:

$$s(t) = \dot{\tilde{q}} + \lambda\tilde{q},$$

где λ – положительный коэффициент, определяющий скорость схождения к скользящей поверхности. Стоит отметить, что сходимость переменной скольжения приводит к экспоненциальной сходимости ошибки слежения. Это позволяет системе выйти на желаемую траекторию и оставаться на ней.

И для случая, когда неизвестны параметры системы, закон управления, приводящий систему к устойчивому состоянию записывается как:

$$u = Y_c(q,\dot{q},\dot{q}_s,\ddot{q}_s)(p_0 + \delta p) - Ks$$

где $\dot{q}_s = \dot{q}_d - \lambda\tilde{q}$ – «виртуальная» скорость, $Y_c(q,\dot{q},\dot{q}_s,\ddot{q}_s)$ – матрица регрессора с подставленными значениями виртуальной скорости и ускорения, p_0 – номинальный вектор параметров, K– матрица коэффициентов усиления. Доказательство сходимости системы при использовании данного алгоритма управления приведены в [7].

Согласно робастному подходу, косвенный сигнал управления, компенсирующий неопределенность в системе, записывается в виде:

$$\delta p = \begin{cases} \rho\dfrac{z}{\|z\|}, \|z\| \geqslant \varepsilon \\ \rho\dfrac{z}{\varepsilon}, \|z\| \leqslant \varepsilon \end{cases},$$

где $z = Y_c^T s$, ρ определяет величину границы неопределенности, ε регулирует эффект дребезжания (чем больше его значение, тем меньше эффект дребезжания).

Программная реализация

Динамика мобильного робота представлена в следующем виде:

$$\begin{cases} \dot{r} = v \\ \dot{q} = \frac{1}{2} S(q)\omega \\ m\dot{v} - mg = R^T(q) \sum_{i=1}^{N} f_i + d(t) \\ I_b\dot{\omega} + \omega \times I_b\omega = \sum_{i=1}^{N} f_i \times r_i(q) \end{cases}$$

где m и I_b— масса и инерция тела, соответственно, r и v — положение и скорость центра масс тела (ЦМ) в мировой системе координат, соответственно, q — единичный кватернион, описывающий ориентацию тела относительно мировой системы координат, $S(q)$ — матричное представление кватерниона, ω — угловая скорость относительно системы отсчета тела, $R^T(q)$ — транспонированная матрица вращения, f_i — внешняя сила воздействия относительно системы отсчета тела, $d(t)$ — внешняя сила воздействия, r_i — положение точки приложенной силы f_i относительно ЦМ, N — количество приложенных сил. Данная система приведена к регрессионной форме, подробнее вывод можно изучить в [7].

В данном разделе представлены результаты симуляции движения мобильного робота. Параметры системы, а также параметры робастного управления приведены в таблице 1. Рисунок 1 показывает изменение координат с течением времени. Начальное положение – [0, 1, 0] (м), желаемое положение – [0.3, 0.7, 0] (м). Рисунок 2 показывает ошибку слежения. Рисунок 3 показывает изменение ориентации тела с течением времени. Начальная ориентация, заданная в виде кватерниона – [0, 0, 0.707, 0.707], конечная ориентация – [0, 0, 0, 1]. Величина внешнего воздействия менялась от -70 до 70 Н*м. Рисунок 4 иллюстрирует изменение скорости. На рисунке 5 показаны компоненты сигнала управления. Для наглядности показаны значения в первые 3 секунды симуляции.

Таблица 1 — Физические параметры мобильного робота и параметры управления

Параметр	Значение
Номинальная масса, кг	9.6
Истинная масса, кг	12
Габариты, д*ш*в ($м^3$)	0.5*0.5*0.2
Коэффициент усиления K	20*I_{6x6}
Коэффициентλ	25
ρ	0.03
ε	0.9
Время симмуляции, с	10

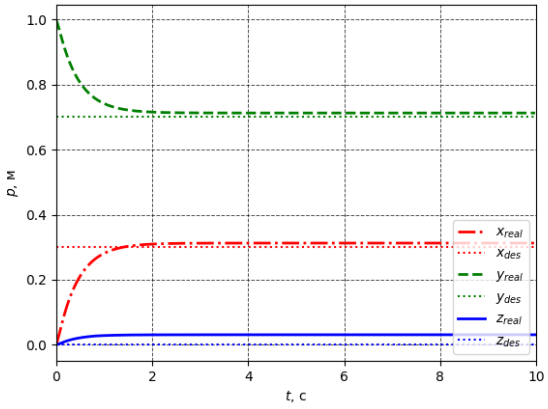


Рисунок 1 — График изменения координат мобильного робота

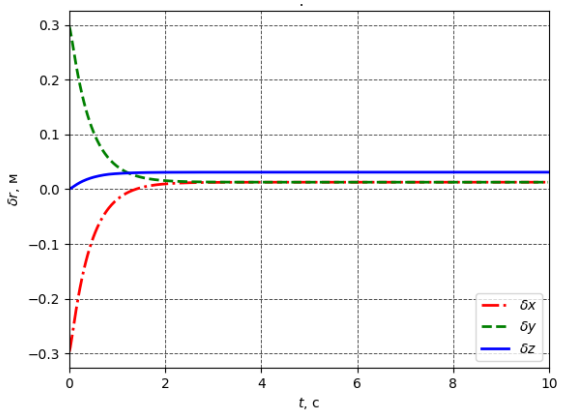


Рисунок 2 — График ошибки слежения мобильного робота

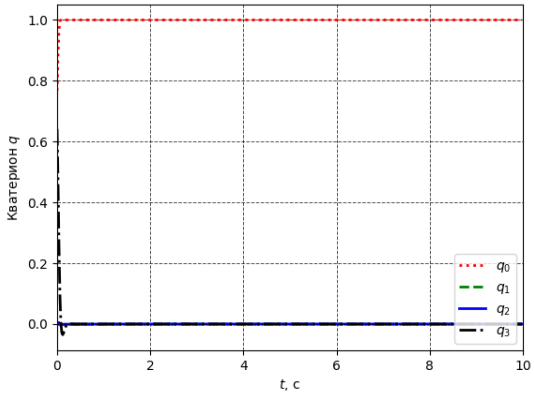


Рисунок 3 — График ориентации мобильного робота

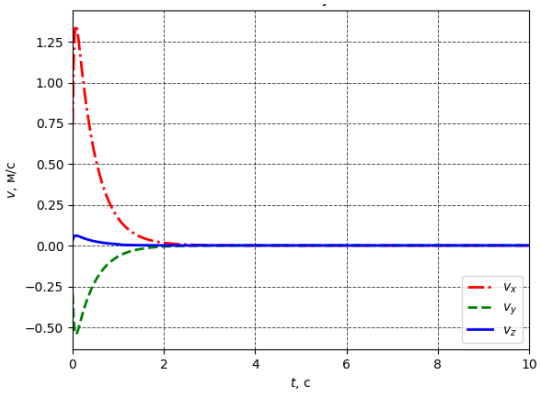


Рисунок 4 — График компонентов скорости мобильного робота

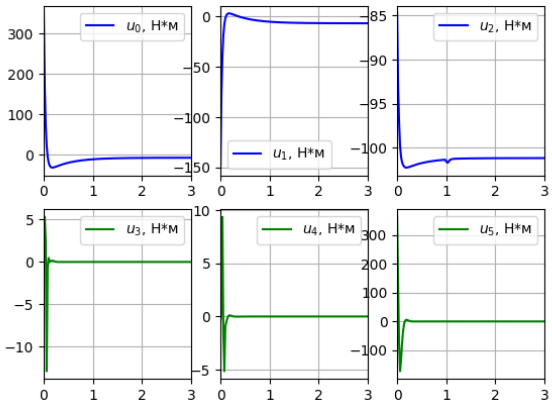


Рисунок 5 — Компоненты сигнала управления в зависимости от времени

Как видно из представленных выше рисунков, робастное управление приводит рассматриваемую систему к заданным значениям. Наибольшая ошибка в координате z составляет приблизительно 0.05 м, что не является критичным в рассматриваемой системе.

Заключение

Реализовано робастное управление мобильной платформой в экстремальных условиях. Динамика системы, записанная в виде уравнения Эйлера-Лагранжа, представлена в регрессионной форме. Учтена неопределенность в инерциальных параметрах системы и наличие внешнего возмущения. Практическая реализация показывает эффективность разработанного алгоритма. Стоит отметить, что здесь не рассмотрена реализация в дискретном режиме, что может уменьшить вычислительную нагрузку, и также не учтено наличие шума во входных сигналах управления. Также для увеличения надежности и эффективности синтезируемого управления необходима интеграция с оптимизационными подходами. Решение этих задач создает возможности для разработки более совершенного алгоритма в будущем.

Литература

1. Афанасьев, В. Н. Управление нелинейными неопределенными динамическими объектами / В. Н. Афанасьев. – Москва : Ленанд, 2020. – 224 с. – ISBN 978-5-9710-7383-3.
2. Nedelchev S. Enhanced Adaptive Control over Robotic Systems via Generalized Momentum Dynamic Extensions / S. Nedelchev, L. Kozlov, R. R. Khusainov, I. Gaponov // Russian Journal of Nonlinear Dynamics. – 2023. – vol. 19. – no. 4. – pp. 633-646. – DOI: 10.20537/nd231212.
3. Di Carlo J. Dynamic Locomotion in the MIT Cheetah 3 Through Convex Model-Predictive Control / J/. Di Carlo, P. M. Wensing, B. Katz, G. Bledt, S. Kim // 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) (Madrid, Spain, 2018). – pp. 1-9, DOI: 10.1109/IROS.2018.8594448.
4. Robust adaptive control Lyapunov-barrier function for non-collocated control and safety of underactuated robotic systems / V. Azimi, S. Hutchinson // International Journal of Robust and Nonlinear Control. – 2022. № 13. – DOI: 10.1002/rnc.6239. – URL: https://doi.org/10.1002/rnc.6239.
5. Wang C. Learning Control Barrier Functions with High Relative Degree for Safety-Critical Control / C. Wang, Y. Meng, Y. Li., S. L. Smith, J. Liu // 2021 European Control Conference, ECC 2021. 2021. P. 1459–1464. DOI: 10.23919/ECC54610.2021.9655206. – ISBN 9789463842365, URL: https://arxiv.org/abs/2011.10721.
6. Xu, Y. Learning Control for Flexible Manipulators with Varying Loads: A Composite Method with Robust Adaptive Dynamic Programming and Robust Sliding Mode Control / Y. Xu, X. Wang, L. Wang, K. Wang, L. Ma // Electronics. – 2022. – vol. 11, 956. – DOI: https://doi.org/10.3390/electronics11060956.
7. Fam C. A. Optimization Driven Robust Control of Mechanical Systems with Parametric Uncertainties, / C. A. Fam, S. Nedelchev // Russian Journal of Nonlinear Dynamics. – 2023, vol. 19, no. 4, pp. 585-597. – DOI:10.20537/nd231205.

Информация об авторах

Фам Чам Ань, ассистент преподавателя, аспирант, Автономная некоммерческая организация высшего образования «Университет Иннополис» (АНО ВО «Университет Иннополис»), Россия, Республика Татарстан, 420500, г. Иннополис, ул. Университетская, д. 1, c.fam@innopolis.university

Неделчев Симеон Иванович, старший преподаватель, АНО ВО «Университет Иннополис», Россия, Республика Татарстан, 420500, г. Иннополис, ул. Университетская, д. 1; ведущий инженер, Sber Robotics Lab, Россия, Москва, 117997, ул. Вавилова, д. 19, s.nedelchev@innopolis.university

Роботизированный комплекс безопасности жизнеобеспечения пунктов временного размещения населения в чрезвычайных ситуациях

И.О. Прутчиков[1]✉, В.В. Камлюк[1], С.А. Терентьев[1], И.В. Гречушкин[2]
[1]*Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования «Военная ордена Жукова академия войск национальной гвардии Российской Федерации» (Академия войск национальной гвардии), Санкт-Петербург, Россия, vpio277254@mail.ru*
[2]*Общество с ограниченной ответственностью «Научно-производственное объединение 122 Управление монтажных работ» (ООО «НПО 122 УМР)», Санкт-Петербург, Россия*

Аннотация
В статье проведён анализ и обоснована актуальность создания и применения эффективных систем (комплексов), предназначенных для мониторинга, контроля и управления техническими системами жизнеобеспечения и безопасности пунктов временного размещения населения в чрезвычайных ситуациях. В исследовании основной акцент сделан на создание роботизированного комплекса безопасности жизнеобеспечения, применение которого позволит повысить эффективность мониторинга, контроля и управления техническими системами жизнеобеспечения и безопасности пунктов временного размещения населения в чрезвычайных ситуациях.

Ключевые слова
Роботизированный комплекс, безопасность, жизнеобеспечение, пункт временного размещения населения, чрезвычайная ситуация, автоматизация, автоматизированная система, мониторинг, контроль и управление техническая система, система жизнеобеспечения, система безопасности, центр управления, эффективность функционирования.

Благодарности
Финансирующая организация: Академия войск национальной гвардии.

A robotic life support safety complex for temporary accommodation of the population in emergency situations

Igor O. Prutchikov[1]✉, Vasily V. Kamluk[1], Sergey A. Terentyev[1], Igor V. Grechushkin[2]
[1]*The Petersburg Federal State-owned Military Educational Institution of Higher Education «Military Order of Zhukov Academy of National Guard Troops of the Russian Federation» (Academy of National Guard Troops), St. Petersburg, Russia, vpio277254@mail.ru*
[2]*Limited Liability Company «Research and Production Association 122 Management of installation works» (LLC «NPO 122 UMR», St. Petersburg, Russia*

Abstract
The article analyzes and substantiates the relevance of the creation and application of effective systems (complexes) designed for monitoring, control and management of technical life support and safety systems of temporary population accommodation in emergency situations. The study focuses on the creation of a robotic life support safety complex, the use of which will increase the effectiveness of monitoring, control and management of technical life support systems and the safety of temporary accommodation facilities in emergency situations.

Key words
Robotic complex, safety, life support, temporary accommodation of the population, emergency, automation, automated system, monitoring, control and management technical system, life support system, security system, control center, operational efficiency.

Acknowledgements
Funding organization: Academy of National Guard Troops.

В последнее время для укрытия населения от поражающих факторов чрезвычайных ситуаций различного характера и при ведении военных действий широкое распространение получили пункты временного размещения населения. Для обеспечения жизнедеятельности населения они оборудуются техническими системами жизнеобеспечения, включая системы теплоснабжения, водоснабжения и канализации. Для осуществления надёжной и бесперебойной работы данных систем жизнеобеспечения создаются системы, которые обеспечивают их мониторинг, контроль и управления. Они позволяют производить централизованный мониторинг,

контроль и управление технических систем и своевременно проводить мероприятия по их восстановлению в случае обнаружения соответствующих неисправностей и повреждений. Полученные достижения в области создания компьютерных технологий, микропроцессорной техники позволили автоматизировать процессы, которые протекают при мониторинге, контроле и управлении сложными системами на базе электронно-вычислительной техники. Так, в работах [1, 2] предложены научно- технические решения, направленные на создание автоматизированных систем, которые предназначены для мониторинга, контроля и управления систем жизнеобеспечения.

В то же время, разработка и широкое использование современных систем безопасности, основанных на широком применении оптико-электронных приборов и компьютерных технологий, создали объективные предпосылки для совместного применения технических систем, обеспечивающих жизнеобеспечение и безопасность на объектах, предназначенных для проживания населения, включая и пункты временного размещения населения, и создания автоматизированных систем их мониторинга, контроля и управления. Причём, при функционировании таких систем наиболее целесообразно использование комплексного подхода по мониторингу, контролю и управлению техническими системами из единого цента управления с использованием средств компьютерной техники. Данный подход использован авторами статьи при разработке новых технических решений [3, 4] по созданию автоматизированных систем, которые осуществляют мониторинг, контроль и управление различными техническими системами. Кроме того, использование подобных систем обеспечивает реализацию возможностей по повышению надёжности управления всех систем за счёт использования запасного пункта управления, по повышению точности управления системами за счёт иерархического построения системы управления, оперативного, достоверного и удалённого контроля за функционированием внешних технических систем, по повышению общей безопасности объектов за счёт ранжирования систем по степени их важности, по осуществлению автономной работы наиболее важных систем в аварийных режимах, по повышению достоверности диагностирования и точности прогнозирования параметров систем, что в конечном итоге приводит к повышению надёжности работы систем, расширению их функциональных возможностей и области применения. Таким образом, создание и применение эффективных систем (комплексов), предназначенных для ониторинга, контроля и управления техническими системами жизнеобеспечения и безопасности является актуальным.

Перспективным направлением, связанным с повышением эффективности функционирования подобных систем (комплексов), является применение технологий робототизации при контроле и управлении техническими системами на основе современных достижений в области робототехники. В рамках данного направления в качестве одного из вариантов по созданию систем (комплексов), предназначенных для мониторинга, контроля и управления техническими системами предлагается новое техническое решение «Роботизированный комплекс безопасности жизнеобеспечения пунктов временного размещения населения в чрезвычайных ситуациях» (см. рис. 1).

Комплекс имеет в своём составе модуль 1, который предназначен для непосредственного управления и контроля техническими системами посредством функционирования блоков управления 1а, 1б… 1n; модуль 2, который предназначен для хранения базы данных с использованием двух серверов 2б, которые подключены к источникам бесперебойного питания 2а, причём один из серверов является резервным; модуль 3, который предназначен для осуществления общего управления системами, модуль 4, который предназначен для контроля параметров бесперебойных подсистем жизнеобеспечения, модуль 5, который предназначен для мониторинга, контроля и управления системами на аварийных режимах, модуль 6, предназначенный для хранения данных мониторинга, контроля и управления.

Кроме того, комплекс имеет, по крайней мере, один мобильный модуль 7, который предназначен для комплексного наблюдения за функционированием внешних систем жизнеобеспечения и безопасности и автономный источник электропитания 8.

Отличительной особенностью предлагаемого комплекса от известных технических решений является то, что он дополнительно снабжен, по крайней мере, одним модулем жизнеобеспечения и безопасности 9 и модулем удалённого контроля и противоаварийного управления системами жизнеобеспечения и безопасности 10, при этом модуль 9 подсоединён и/или имеет возможность подсоединения к оборудованию технических систем жизнеобеспечения и безопасности, внешним системам и подсоединён к модулю 10, который в свою очередь подключён к модулю 5, который предназначен для мониторинга, контроля и управления системами на аварийных режимах и связан каналами связи с мобильным модулем 7, а источник электропитания 8 подключён ко всем источникам бесперебойного питания.

Приведённое обстоятельство позволяет обеспечить:

– возможности по использованию ресурсов внешних систем при функционировании объекта в условиях возникновения и развития чрезвычайных, аварийных ситуаций различного характера, по проведению активного мониторинга и противоаварийного управления внешними системами жизнеобеспечения и безопасности, которые могут включать в себя системы теплоснабжения, водоснабжения, водоотведения, электроснабжения, физической и противопожарной защиты, контроля доступа посторонних лиц, охраны периметра объекта, экологического, радиационного, химического и биологического контроля;

– возможности по удаленному противоаварийному управлению, включая управление с использованием ресурсов и аварийных внешних средств, обеспечивающих жизнеобеспечение и безопасность, по прямому внешнему аварийному жизнеобеспечению и обеспечению безопасности автономного объекта при выходе из строя его штатных обеспечивающих жизнедеятельность и безопасность систем.

Достигнутые новые технические результаты приводят к расширению функциональных возможностей, области применения и повышению эффективности работы комплекса.

Модуль жизнеобеспечения и безопасности 9 предназначен для гарантированного обеспечения жизнедеятельности и безопасности в случае возникновении аварийных ситуаций и включает в свой состав средства управления, аварийные технические системы жизнеобеспечения и безопасности, источники бесперебойного питания. Он может быть реализован в стационарном исполнении известными средствами [5, 6] или в передвижном исполнении известными средствами [7, 8]. В частности, модуль 9 для обеспечения гарантированного электроснабжения автономных объектов может быть выполнен в виде комбинированной энергоустановки контейнерного типа с использованием технологий аккумулирования, реверсивного частотного регулирования и преобразования энергии. Эффективная работа подобных установок основана на допустимости и возможности совместной (параллельной) работы электромашинных преобразователей энергии (например, двигатель-генераторных установок с ДВС) и статических преобразователей электроэнергии с требуемыми для гарантированного электроснабжения ответственных потребителей показателями надежности, устойчивости и качества вырабатываемой энергии. Особенно это актуально в современных условиях, поскольку позволяет достаточно органично включить в состав агрегатов, установок и систем гарантированного электроснабжения статические преобразователи из состава статических источников бесперебойного электропитания, альтернативных и нетрадиционных источников электроэнергии, например, на базе солнечных батарей, ветрогенераторов и т.п. В качестве универсального статического преобразователя электроэнергии для условий применения в комбинированных энергоустановках с режимом параллельной работы электромашинных и статических преобразователей предложено использовать реверсивные преобразователи электроэнергии, способные эффективно работать в параллель с электромашинными преобразователями энергии и двунаправлено передавать мощность между шинами переменного и постоянного тока.

Модуль 10, который обеспечивает удалённый контроль и противоаварийное управление обеспечивающими системами, предназначен для непосредственного управления движением мобильного модуля комплексного наблюдения 7 и размещённом на нём комплексом средств обнаружения и распознавания событий; приёма, обработки, отображения, передачи информации о состоянии внешних систем жизнеобеспечения и безопасности; управления функционированием модуля 9 и включает средства управления, приёма, обработки, отображения и передачи информации со встроенными источниками бесперебойного питания. Также он передает данные в модуль 5, который обеспечивает мониторинг, контроль и управление системами на аварийных режимах для принятия в нем решений по противоаварийному управлению техническими системами объекта по сигналам о состоянии внешних систем.

В частном исполнении модули жизнеобеспечения и безопасности могут быть выполнены в контейнерном или мобильном исполнении, подключены постоянно или иметь возможность подключения к оборудованию технических систем жизнеобеспечения и безопасности, внешним системам в случае возникновения аварийных ситуаций.

Отличительной особенностью функционирования комплекса является то, что соединенные каналами связи модули системы обеспечивают дополнительное, дистанционное, автоматическое и автоматизированное управление и контроль оборудования технических обеспечивающих систем, внешних обеспечивающих систем в аварийных режимах функционирования, которое осуществляется за счёт ресурсов аварийных систем жизнеобеспечения и безопасности модуля 9 с использованием модулей 9 и 10.

Необходимо отметить, что данное функционирование системы рассмотрено для случая использования модуля (модулей) 9 в стационарном исполнении. В случае использования модуля (модулей) 9 в передвижном исполнении в случае возникновения аварийных ситуаций данный модуль (модули) перемещается (перемещаются) оператором к месту возникновения аварийной ситуации, в том числе и дистанционно с использованием оператором дистанционного пульта управления, а затем оператором подсоединяется (подсоединяются) к оборудованию технических обеспечивающих, внешним системам. При этом функционирование системы осуществляется аналогично вышерассмотренному случаю.

Комплекс обеспечивает надежную взаимосвязь и работу всех модулей в среде общего защищенного программного обеспечения. Таким образом, предлагаемый роботизированный комплекс безопасности жизнеобеспечения пунктов временного размещения населения в чрезвычайных ситуациях позволяет расширить функциональные возможности, область применения и повысить эффективность работы комплекса за счет обеспечения возможностей по использованию ресурсов внешних технических систем при функционировании объекта в условиях возникновения аварийных ситуаций; по активному мониторингу и противоаварийному управлению внешними обеспечивающими жизнедеятельность и безопасность системами; по удаленному противоаварийному управлению, включая управление с использованием ресурсов и аварийных внешних средств жизнеобеспечения и безопасности; по прямому внешнему аварийному жизнеобеспечению и обеспечению безопасности автономного объекта при полном выходе из строя его штатных обеспечивающих систем.

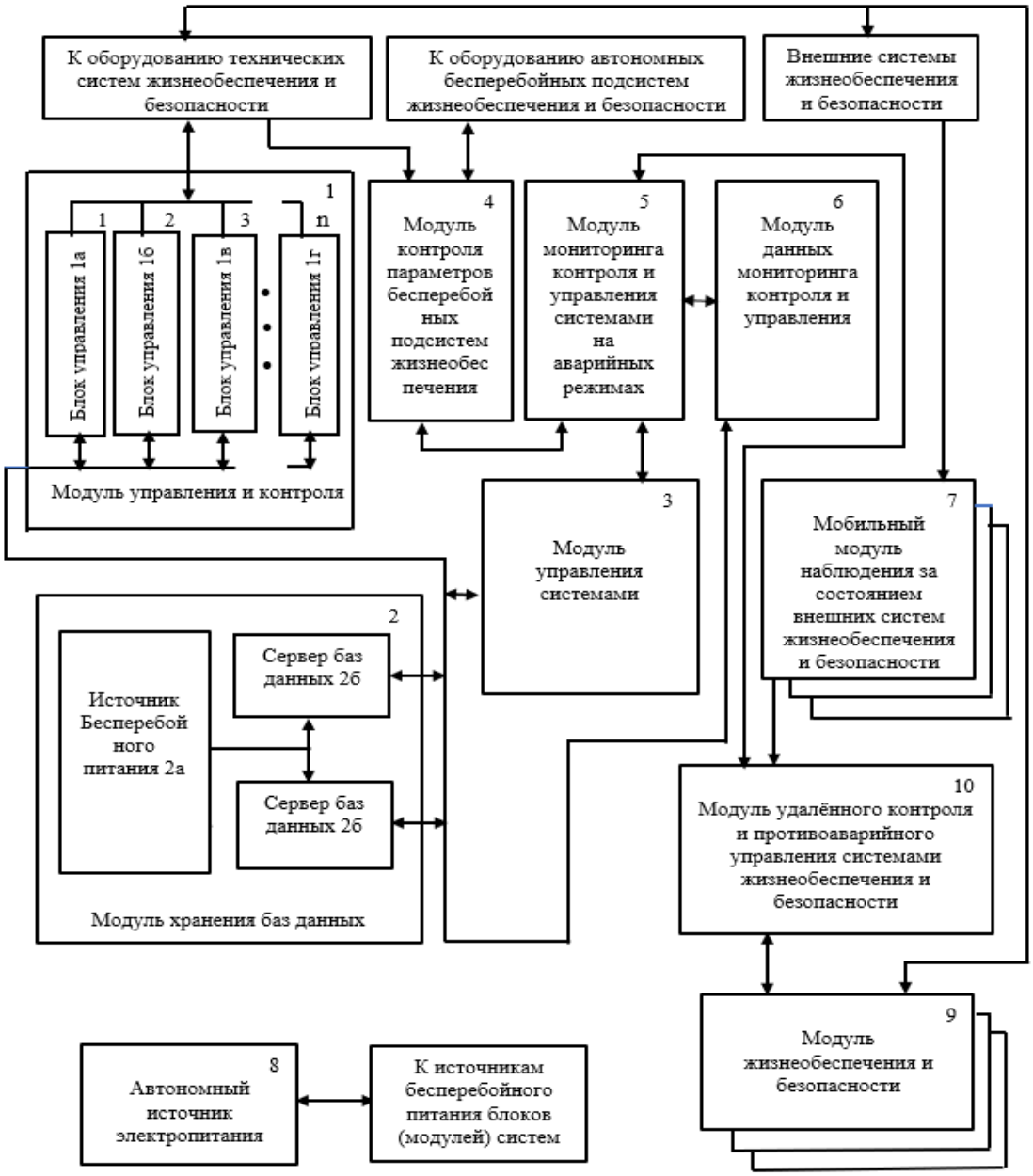


Рисунок 1 — Роботизированный комплекс безопасности жизнеобеспечения пунктов временного размещения населения в чрезвычайных ситуациях

Литература

1. Патент 2133490, Российская Федерация, МПК G05B 15/00, G05B 23/00. Структурированная система мониторинга и управления инженерным оборудованием объекта. [Текст] / Гинзбург В.В. и др.; заявитель и патентообладатель Гинзбург В.В - №98117308/09; заявл. 21. 09.1998; опубл. 20.07.1999.

2. Патент 2566341, Российская Федерация, МПК G05B 13/02. Интегрированная автоматизированная система контроля и управления системами жизнеобеспечения и защиты специальных объектов. [Текст] / Кондратов С.Ф.; патентообладатель Закрытое акционерное общество «Алгонт» - №2014103357/08; заявл. 31.01.2014; опубл. 10.08.2015. Бюл. №29.

3. Патент 2719714, Российская Федерация, МПК G05B 13/00, G08B 19/00, G08B 21/02. Комплексная система мониторинга, контроля и управления техническими системами жизнеобеспечения и безопасности автономных объектов [Текст] / Прутчиков И.О, Гречушкин И.В. и др.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное казённое военное образовательное учреждение высшего образования «ВОЕННАЯ АКАДЕМИЯ МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ имени генерала армии А.В. Хрулёва». - №2019114635; заявл. 13.05.2019; опубл. 22.04.2020. Бюл. № 12.

4. Патент 2779017, Российская Федерация, МПК G05B 13/02. Комплексная система мониторинга, контроля и управления техническими системами жизнеобеспечения и безопасности автономных объектов [Текст]

/ Прутчиков И.О, Гречушкин И.В., Камлюк В.В. и др.; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Научно-производственное объединение 122 Управление монтажных работ». - №2022112733; заявл. 06.05.2022; опубл. 30.08.2022. Бюл. № 25.

5. Прутчиков И.О., Михайлов В.И., Камлюк В. Модули энергетической безопасности автономных объектов на базе комбинированных установок // Журнал: «Двигателестроение». №1. 2019. С.28-32.

6. Прутчиков И.О., Камлюк В.В. и др. Моделирование, расчёт параметров и режимов работы систем мониторинга, контроля и управления бесперебойным жизнеобеспечением автономных объектов на основе комбинированного применения оптико-электронных средств обнаружения и распознавания событий // Журнал: «Морской вестник». № 2. 2018 г. С.75-80.

7. Прутчиков И.О., Камлюк В.В. и др. Перспективы разработки и применения мобильных модулей энергетической безопасности на базе самоходных шасси с электротрансмиссией // Актуальные проблемы защиты и безопасности. Труды XXII Всероссийской научно-практической конференции РАРАН. Том 3. СПб.: Российская академия ракетных и артиллерийских наук. 2019. С. 92-96.

8. Патент на полезную модель № 84172, Российская Федерация, МПК H02M 5/12, H02M 7/02. Мобильная электроустановка для электропитания специального оборудования [Текст] / Хвостов В.И., Мирошник В.П.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное унитарное предприятие «НИИ «Экран» - № 2008139255/22, Заявл. 02. 10. 2008, опубл.27.06.2009. Бюл. № 18.

Информация об авторах

Прутчиков Игорь Олегович, профессор, д.т.н., профессор, Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования «Военная ордена Жукова академия войск национальной гвардии Российской Федерации» (Академия войск национальной гвардии), Россия, 198206, Санкт-Петербург, ул. Л. Пилютова, д. 1, vpio277254@mail.ru

Камлюк Василий Владимирович, д.т.н., профессор, Академия войск национальной гвардии, Россия, 198206, Санкт-Петербург, ул. Л. Пилютова, д. 1, npo122umr@mal.ru

Терентьев Сергей Алексеевич, начальник кафедры, Академия войск национальной гвардии, Россия, 198206, Санкт-Петербург, ул. Л. Пилютова, д. 1, serginio77777@mail.ru

Гречушкин Игорь Васильевич, к.т.н, с.н.с., Общество с ограниченной ответственностью «Научно-производственное объединение 122 Управление монтажных работ» (ООО «НПО 122 УМР»), Россия, 193168, Санкт-Петербург, ул. Антонова-Овсеенко, д. 18, irgrechuhkin1949@yandex.ru

Перспективы создания и применения мобильных робототехнических комплексов мониторинга состояния технических систем объектов критической инфраструктуры

И.О. Прутчиков[1]✉, В.В. Камлюк[1], С.А. Терентьев[1], И.В. Гречушкин[2]
[1]*Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования «Военная ордена Жукова академия войск национальной гвардии Российской Федерации» (Академия войск национальной гвардии), Санкт-Петербург, Россия, vpio277254@mail.ru*
[2]*Общество с ограниченной ответственностью «Научно-производственное объединение 122 Управление монтажных работ» (ООО «НПО 122 УМР)», Санкт-Петербург, Россия*

Аннотация
В статье рассматриваются вопросы, связанные с применением современных технологий автоматизации и роботизации, направленных на эффективное функционирование систем мониторинга состояния технических систем объектов критической инфраструктуры, проведён анализ и показано, что применение предложенных мобильных робототехнических комплексов мониторинга состояния технических систем на основе имеющегося научно-технического задела по созданию наземных робототехнических комплексов и беспилотных летательных аппаратов позволит повысить эффективность их работы, расширить их функциональные возможности и область применения.

Ключевые слова
Автоматизация, робототизация, мониторинг, техническая система, система жизнеобеспечения, система безопасности, критическая инфраструктура, научно-технический задел, наземный робототехнический комплекс, беспилотный летательный аппарат, эффективность функционирования, функциональные возможности, область применения.

Благодарности
Финансирующая организация: Академия войск национальной гвардии.

Prospects for the creation and application of mobile robotic complexes for monitoring the condition of technical systems of critical infrastructure facilities

Igor O. Prutchikov[1]✉, Vasily V. Kamluk[1], Sergey A. Terentyev[1], Igor V. Grechushkin[2]
[1]*The Petersburg Federal State-owned Military Educational Institution of Higher Education «Military Order of Zhukov Academy of National Guard Troops of the Russian Federation» (Academy of National Guard Troops), St. Petersburg, Russia, vpio277254@mail.ru*
[2]*Limited Liability Company «Research and Production Association 122 Management of installation works» (LLC «NPO 122 UMR»), St. Petersburg, Russia*

Abstract
The article discusses issues related to the use of modern automation and robotics technologies aimed at the effective functioning of systems for monitoring the state of technical systems of critical infrastructure facilities, analyzes and shows that the use of the proposed mobile robotic systems for monitoring the state of technical systems based on the existing scientific and technical groundwork for the creation of ground-based robotic complexes and unmanned aerial vehicles will improve the effectiveness of their work, expand their functionality and scope.

Key words
Automation, robotization, monitoring, technical system, life support system, security system, critical infrastructure, scientific and technical reserve, ground-based robotic complex, unmanned aerial vehicle, operational efficiency, functionality, scope of application.

Acknowledgements
Funding organization: Academy of National Guard Troops.

Стремительное ускорение научно-технического прогресса в настоящее время создаёт объективные предпосылки для создания новых технологий, связанных с автоматизацией и роботизацией функционирования сложных систем, которые могут быть эффективно применены для решения задач обеспечения безопасного функционирования объектов критической инфраструктуры.

Так, развитие компьютерных и информационных технологий позволило автоматизировать различные процессы мониторинга, контроля и управления сложными техническими системами, включая системы

жизнеобеспечения и безопасности, которыми оборудованы современные объекты критической инфраструктуры. При этом, как показано в работах [1-4], наиболее эффективно использование автоматизированных систем, в которых применён комплексный подход по мониторингу, контролю и управлению различных систем. В целях повышения эффективности функционирования подобных систем, расширения их функциональных возможностей и области применения авторами разработаны новые технические решения [5,6], которые обеспечивают возможности по надёжному управлению всех систем, как с основного, так и с запасного пунктов управления; по повышению точности управления системами за счёт иерархического построения системы управления; по повышению общей безопасности объектов за счёт ранжирования систем по степени их важности; по автономной работе наиболее важных систем в аварийных режимах; по повышению достоверности диагностирования и точности прогнозирования параметров систем.

Вместе с тем, в рассматриваемых автоматизированных системах отсутствуют возможности по проведению активного мониторинга и противоаварийного управления внешними системами жизнеобеспечения, которые могут включать в себя сети электроснабжения, теплоснабжения, водоснабжения и водоотведения, подстанции систем электроснабжения, очистные сооружения систем водоотведения и другие системы, а также внешними системами безопасности, которые могут включать в себя противопожарные, охрану периметра территории, контроля внешнего доступа, экологического, радиационного, химического и биологического контроля и другие системы, что ограничивает их функциональные возможности и область применения. Дополнительно к этому отсутствуют возможности по удалённому, оперативному и достоверному контролю за состоянием внешних систем жизнеобеспечения и безопасности, особенно в условиях угроз и возникновения чрезвычайных и аварийных ситуаций различного характера, что снижает эффективность функционирования систем.

В целях устранения указанных недостатков предлагается создание и применение мобильных робототехнических комплексов мониторинга состояния технических систем объектов критической инфраструктуры, причём такие комплексы могут функционировать как в составе систем мониторинга, контроля и управления техническими системами жизнеобеспечения и безопасности автономных объектов [7], так и самостоятельно. Структурная схема одного из таких комплексов представлена на рисунке 1.

Мобильный робототехнический комплекс мониторинга состояния технических систем жизнеобеспечения и безопасности автономных объектов содержит, по крайней мере, один мобильный модуль наблюдения за состоянием внешних систем жизнеобеспечения и безопасности (1), и модуль удалённого мониторинга внешних систем жизнеобеспечения и безопасности (2). При этом модуль (1) связан каналами связи с внешними системами жизнеобеспечения и безопасности и с модулем удалённого мониторинга внешних систем жизнеобеспечения и безопасности (2), который подсоединён к комплексной системе мониторинга, контроля и управления техническими системами автономных объектов.

Мобильный модуль комплексного наблюдения за состоянием внешних систем жизнеобеспечения и безопасности (1) осуществляет дистанционный, автоматизированный сбор, обработку и передачу информации о состоянии внешних систем жизнеобеспечения и безопасности и содержит комплекс средств обнаружения и распознавания событий с собственной системой управления и передачи данных, смонтированных на мобильном робототехническом средстве передвижения (беспилотном летательном аппарате, наземном робототехническом комплексе и др.) При этом движение мобильного модуля комплексного наблюдения может осуществляться как автономно по заданной программе, так и дистанционно с использованием оператором дистанционного пульта управления.

В настоящее время для создания мобильного модуля комплексного наблюдения на базе наземного робототехнического комплекса предлагается использовать научно-технический задел по созданию наземных робототехнических комплексов, в том числе и для решения задач по обеспечению безопасности объектов [8-12]. Так, в настоящее время известны такие робототехнические комплексы, как робототехнический комплекс «Трал Патруль» (отечественного производства) и робототехнический комплекс «MDARS» (иност. производства) [13].

Робототехнический комплекс «Трал Патруль» (см. рис. 2) предназначен для охраны важных объектов (скла-дов, баз и др.) и представляет собой комплекс, имеющий в своём составе систему видеонаблюдения, которая включает в себя 6 видеокамер и конструктивно установлена на малогабаритную самоходную платформу с элек-тромеханическим типом движителя.

Управление движением платформы может осуществляться в дистанционном и автономном режимах. В дистанционном режиме управление движением платформы осуществляет оператор с использованием дистанционного пульта управления и планшета, а в автономном режиме осуществляется адаптивное управление движением платформы на основе данных, которые хранятся в базе данных (маршруты движения, опорные ориентиры).

Система видеонаблюдения предназначена для обнаружения людей и объектов 6 панорамными видеокамерами в радиусе до 50 метров. Она включается на участках маршрута движения комплекса, с которых наиболее эффективно проводить видеонаблюдение.

Робототехнический комплекс «MDARS» (см. рис. 3), разработанный в США, предназначен для патрулирования охраняемых территорий, оценки факта несанкционированного доступа, обнаружения посторонних лиц, проверки запоров и ограждений, реагирования на сигналы тревоги. Конструктивно аппаратура комплекса размещена на телеуправляемой 4–х колёсной платформе, которая приводится в движение с использованием дизель-генераторной установки, которая позволяет развивать скорость до 35 км/ч. При этом предусмотрено

бесшумное движение комплекса в пределах 2 часов от аккумуляторных батарей. Автономная работа комплекса до очередной дозаправки топливом составляет 12 часов. Комплекс имеет в своём составе системы управления движением, обнаружения проникновения посторонних лиц к объекту и контроля состояния ограждений и запорных устройств. В случае обнаружения незаконного проникновения в охраняемую зону подаются соответствующие звуковые и световые сигналы и осуществляется оповещение об этом оператора. Система управления движением имеет возможность функционировать в двух режимах: дистанционном и автоматическом. Движение комплекса в автоматическом режиме осуществляется с использованием системы навигации (DGPS) и характеристик заданного маршрута.

Для уточнения движения и исключения накапливающей ошибки дополнительно используется навигация по наземным ориентирам. Дистанционный режим работы осуществляется оператором с использованием дистанционного пульта управления при обнаружении факта проникновения на охраняемую территорию посторонних лиц или при возникновении не предусмотренных препятствий движению комплекса. Во время движения комплекса для обнаружения и обхода препятствий используются сканирующее лазерное устройство среднего и ближнего радиуса действия и оптическая система. Для обнаружения факта несанкционированного проникновения на охраняемую территорию используются сканирующий радиолокатор и инфракрасная система переднего обзора, которые установлены на вращающейся башне.

Анализ конструктивного исполнения и тактико-технических характеристик данных комплексов свидетельствует о том, что они имеют следующие общие признаки:

1. Аппаратура установлена на самоходные транспортные платформы с электромеханическим типом движителя.
2. Для обнаружения факта проникновения на территорию охраняемого объекта используется система технического зрения, которая может включать в свой состав видеокамеры, радары и лидары.
3. Система управления движением имеет возможность функционировать в двух режимах: дистанционном и автоматическом. Дистанционный режим управления осуществляется оператором с использованием дистанционного пульта управления при возникновении нештатных ситуаций, а автоматический режим управления используется при адаптивном управлении движением комплекса по охраняемой территории на основе данных (характеристик маршрута движения, наземных ориентиров).
4. Автономный режим работы ограничен временем автономной работы источника электрической энергии (аккумуляторных батарей или дизель-генераторной установки).

Для создания мобильного модуля комплексного наблюдения на базе беспилотного летательного аппарата (БЛА) предлагается использовать научно-технический задел по созданию разведывательных (БЛА), в том числе, предназначенных для технической разведки повреждённых образцов техники [14,15]. В качестве примера на рисунке 3 приведён БЛА «Орлан-3М», который предназначен для выполнения панорамной и детальной фото- и видеосъемки местности.

Корпус БЛА изготовлен из композитных материалов, радиус действия составляет до 100 км, а время полёта - до 180 минут. Управление БЛА осуществляется с наземного пункта управления (переносного, мобильного или стационарного). Система видеонаблюдения включает в свой состав гиростабилизированную телекамеру, фотокамеру, видеокамеру, тепловизор, причём модульное построение системы позволяет изменять её состав без особых сложностей. Одним из преимуществ БЛА «Орлан-3М» является возможность его применения в сложных погодных условиях.

Комплекс средств обнаружения и распознавания событий, который установлен на мобильный модуль комплексного наблюдения (1), может включать в свой состав комбинированные оптико-электронные средства, видеокамеры, тепловизионные приборы, приборы ночного видения, анализаторы спектра электромагнитного и радиационного состава и термодинамических параметров окружающей среды.

Модуль удалённого мониторинга внешних систем жизнеобеспечения и безопасности 2 предназначен для управления движением мобильного модуля комплексного наблюдения 1 и комплексом средств обнаружения и распознавания событий, приёма, обработки, отображения и передачи информации о состоянии внешних систем жизнеобеспечения и безопасности и содержит средства управления, приёма, обработки, отображения и передачи информации со встроенными источниками бесперебойного питания. Также он передает данные в другие системы, например, в комплексную систему мониторинга, контроля и управления техническими системами автономных объектов для принятия в нем решений по противоаварийному управлению системами объекта по сигналам о состоянии внешних систем.

Таким образом, создание и применение мобильных робототехнических систем мониторинга состояния технических систем объектов критической инфраструктуры позволит обеспечить возможности по активному мониторингу, противоаварийному управлению внешними системами жизнеобеспечения и безопасности и по оперативному, достоверному и удалённому контролю за состоянием данных систем, особенно в условиях возникновения чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера, преднамеренных действий нарушителей и злоумышленников и незаконного проникновения посторонних лиц на территорию объектов, а её применение в составе автоматизированных систем мониторинга позволит повысить эффективность их работы, расширить их функциональные возможности и область применения.

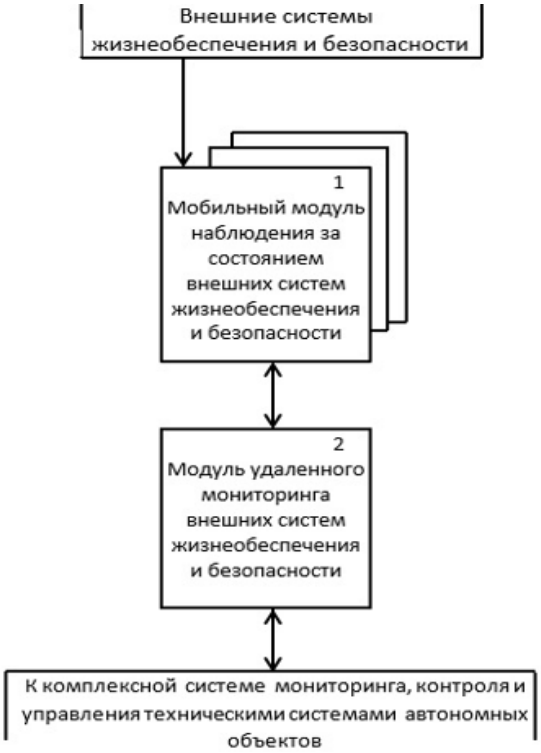


Рисунок 1 — Структурная схема мобильного робототехнического комплекса мониторинга состояния технических систем объектов критической инфраструктуры

Рисунок 2 — Робототехнический комплекс «Трал Патруль»

Рисунок 3 — Робототехнический охранный комплекс “MDARS”

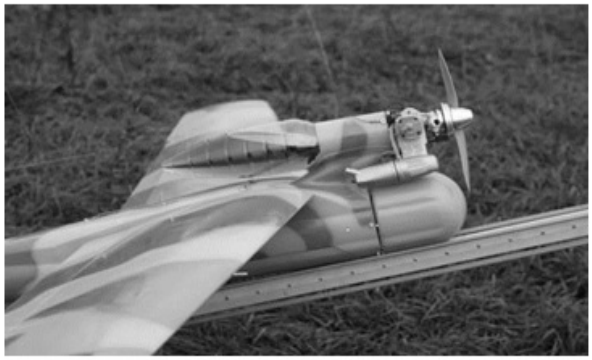


Рисунок 4 — Беспилотный летательный аппарат «Орлан-3М»

Литература

1. Patent N US 5684374, G05B 13/00. Method and apparatus for tuning a motion control system having an external velocity loop, Allen-Bradley Company, publ. 04.11.97.
2. Patent N DE 4125839, G05B 15/00. Domestic supply system for house and building – has communal rooms with supply coupled to distributors having computer intelligence for control to meet demands, applicants Burkard Guenther, publ. 04.02.93.
3. Патент 2133490, Российская Федерация, МПК G05B 15/00, G05B 23/00. Структурированная система мониторинга и управления инженерным оборудованием объекта. [Текст] / Гинзбург В.В. и др.; заявитель и патентообладатель Гинзбург В.В - №98117308/09; заявл. 21.09.1998; опубл. 20.07.1999.
4. Патент 2566341, Российская Федерация, МПК G05B 13/02. Интегрированная автоматизированная система контроля и управления системами жизнеобеспечения и защиты специальных объектов. [Текст] / Кондратов С.Ф.; патентообладатель Закрытое акционерное общество «Алгонт» - №2014103357/08; заявл. 31.01.2014; опубл. 10.08.2015. Бюл. №29.
5. Патент 2719714, Российская Федерация, МПК G05B 13/00, G08B 19/00, G08B 21/02. Комплексная система мониторинга, контроля и управления техническими системами жизнеобеспечения и безопасности автономных объектов [Текст] / Прутчиков И.О, Гречушкин И.В., Камлюк В.В. и др.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное казённое военное образовательное учреждение высшего образования «ВОЕННАЯ АКАДЕМИЯ МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ имени генерала армии А.В. Хрулёва». - №2019114635; заявл. 13.05.2019; опубл. 22.04.2020. Бюл. № 12.
6. Патент 2779017, Российская Федерация, МПК G05B 13/02. Комплексная система мониторинга, контроля и управления техническими системами жизнеобеспечения и безопасности автономных объектов [Текст] / Прутчиков И.О, Гречушкин И.В., Камлюк В.В., Сизько Д.В.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное казённое военное образовательное учреждение высшего образования «ВОЕННАЯ АКАДЕМИЯ МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ имени генерала армии А.В. Хрулёва». - №2020142367; заявл. 21.12.2020; опубл. 17.11.2021. Бюл. № 32.
7. Патент 2759757, Российская Федерация, МПК G05B 13/02. Комплексная система мониторинга, контроля и управления техническими системами жизнеобеспечения и безопасности автономных объектов [Текст] / Прутчиков И.О, Гречушкин И.В., Камлюк В.В., Малиновский О.В., Шелест С.Н.; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Научно-производственное объединение 122 Управление монтажных работ». - № 2022112733; заявл. 06.05.2022; опубл. 30.08.2022. Бюл. № 25.
8. Мобильные робототехнические комплексы. Сборник статей. - М.: ООО «Сам Полиграфист», 2014 - 118 с.
9. Перспективы развития наземных робототехнических комплексов наземного и специального назначения / Ю.В. Корчак, В.С. Лапшов, И.В. Рубцов [и др.] // Известия ЮФУ, 2015. № 4. С. 83 - 95.
10. Овчинников В.В., Мингалеев С.Г., Жесткова С.Г. Перспективы развития робототехнических комплексов для решения задач единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций // Технологии гражданской безопасности - №3, М: 2018. С.5-8.
11. Иваненков В.В, А.Н. Кутузов А.Н., Панков В.А., И.В. Рубцов И.В. Роботизированная система охраны и обороны специальных объектов и участков границы // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана - № 11, М: 2012 С. 4-27.
12. Патент на полезную модель № 175637 Российская Федерация, МПК H 01 R 13/52, H 02 I 17/00. Робототехнический комплекс для проведения технической разведки [Текст] / Матушкин В.Л. и др.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное казённое военное образовательное учреждение высшего образования «ВОЕННАЯ АКДЕМИЯ МАТЕРИАЛЬНО-ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ имени генерала армии А. В. Хрулёва - № 2016140924, Заявл. 01. 10. 2016, Опубл.13.10.2017. Бюл. № 23.
13. Гречушкин И.В., Прутчиков И.О., Камлюк В.В. Особенности и перспективы применения наземных робототехнических комплексов военного назначения с электротрансмиссией для защиты, охраны и обороны сил

и средств материально-технического обеспечения Вооружённых Сил Российской Федерации // Сборник научных трудов «Актуальные проблемы военно-научных исследований», выпуск 2(14), СПб: Изд-во, 2021 г., С. 73-83.

14. Патент 2749540, Российская Федерация, МПК B25J 5/00, F41 H 11/00, F41 H 13/00. Способ проведения технической разведки повреждённых образцов вооружения и военной техники [Текст] / Гречушкин И.В., Прутчиков И.О., Репин А.В.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное казённое военное образовательное учреждение высшего образования «ВОЕННАЯ АКАДЕМИЯ МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ имени генерала армии А.В. Хрулёва». - №2020133606; заявл. 12.10.2020; опубл. 15.06.2021. Бюл. № 17.

15. Патент 2750942, Российская Федерация, МПК B60W 30/165, B60W 30/18, G07C 5/08, G08G 1/00, G08G 1/16. Способ прогностического иерархического управления интеллектуальной транспортной системой при управлении движением колонны [Текст] / Гречушкин И.В., Прутчиков И.О. и др.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное казённое военное образовательное учреждение высшего образования «ВОЕННАЯ АКАДЕМИЯ МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ имени генерала армии А.В. Хрулёва». - №2020133607; заявл. 12.10.2020; опубл. 06.07.2021. Бюл. № 19.

Информация об авторах

Прутчиков Игорь Олегович, профессор, д.т.н., профессор, Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования «Военная ордена Жукова академия войск национальной гвардии Российской Федерации» (Академия войск национальной гвардии), Россия, 198206, Санкт-Петербург, ул. Л. Пилютова, д. 1, vpio277254@mail.ru

Камлюк Василий Владимирович, д.т.н., профессор, Академия войск национальной гвардии, Россия, 198206, Санкт-Петербург, ул. Л. Пилютова, д. 1, npo122umr@mal.ru

Терентьев Сергей Алексеевич, начальник кафедры, Академия войск национальной гвардии, Россия, 198206, Санкт-Петербург, ул. Л. Пилютова, д. 1, serginio77777@mail.ru

Гречушкин Игорь Васильевич, к.т.н, с.н.с., Общество с ограниченной ответственностью «Научно-производственное объединение 122 Управление монтажных работ» (ООО «НПО 122 УМР)», Россия, 193168, Санкт-Петербург, ул. Антонова-Овсеенко, д. 18, irgrechuhkin1949@yandex.ru

Разработка системы управления комфортом пассажиров с учетом скорости на основе данных наблюдений для общественного транспорта

Язан Вассуф[1,2], Г.В. Цокуренко[2], К.Г. Мещерин[2], В.В. Серебренный[1]
[1]МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия, vassufya@bmstu.ru, vsereb@bmstu.ru
[2]ООО «ИЦ «КАМАЗ», Москва, Россия, vassufY@kamaz.ru, TsokurenkoGV@kamaz.ru, MescherinKG@kamaz.ru

Аннотация
В современных условиях, когда безопасность и комфорт пассажиров на общественном транспорте имеют первостепенное значение, интеллектуальные системы помощи водителю играют ключевую роль. В данном исследовании представлена архитектура системы, использующей радар и камеры для сбора данных, а также системы управления скоростью и комфортом (подвеской). Рассматриваются алгоритмы, регулирующие скорость транспортного средства и параметры подвески на основе данных об окружающих объектах. Также разработан и протестирован алгоритм Активного Управления Подавлением Помех (АУПП), который обеспечивает эффективное управление скоростью независимо от изменения динамики транспортного средства. Особое внимание уделено обеспечению комфорта пассажиров при движении, что достигнуто с помощью оптимизированного алгоритма управления подвеской, адаптирующегося к условиям движения в городских пробках и на дорогах типа «D». Результаты моделирования подтверждают возможность применения данного подхода в различных условиях эксплуатации.

Ключевые слова
Системы помощи водителю (СПВ), автономное вождение, безопасность дорожного движения, КАМАЗ, управление скоростью, управление комфортом, подвеска, АУПП, общественный транспорт.

Development of a speed-based passenger comfort control system based on observation for public transport

Yazan Wassouf[1,2], Grigory V. Tsokurenko[2], Konstantin G. Meshcherin[2], Vladimir V. Serebrenny[1]
[1]Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia, vassufya@bmstu.ru, vsereb@bmstu.ru
[2]«IC KAMAZ» LLC , Moscow, Russia, vassufY@kamaz.ru, TsokurenkoGV@kamaz.ru, MescherinKG@kamaz.ru

Abstract
In modern conditions, where the safety and comfort of passengers on public transport are of paramount importance, intelligent driver assistance systems play a key role. This study presents the architecture of a system that utilizes radar and cameras for data collection, as well as speed and comfort (suspension) control systems. Algorithms for regulating vehicle speed and suspension parameters based on data from surrounding objects are discussed. Additionally, an Active Disturbance Rejection Control (ADRC) algorithm was developed and tested, ensuring effective speed control regardless of changes in vehicle dynamics. Particular attention is paid to passenger comfort during travel, achieved through an optimized suspension control algorithm that adapts to urban traffic conditions and «D»-type roads. Simulation results confirm the applicability of this approach in various operating conditions.

Keywords
Advanced driver assistance systems (ADAS), autonomous driving, road safety, KAMAZ, speed control, comfort control, suspension, ADRC, public transport.

Введение

Работа системы помощи водителю, включающей в себя управление движением, считается бессмысленной без обеспечения комфорта пассажиров. Часто система получает данные об окружающей среде через различные датчики. В [1] обсуждается выбор радаров с учётом их эффективности в условиях российской погоды. Также возможность камеры распознавать пешеходов и разметки делает её незаменимой. После получения информации об окружающей среде происходит оценка состояния транспортного средства (ТС) относительно объектов на дороге. С помощью системы оценки состояния можно определить требуемую скорость ТС и далее обеспечить необходимый комфорт пассажиров. Общая схема системы представлена на рисунке 1:

Рисунок 1 — Общая схема системы ИСПВ

В [2] разработан алгоритм управления скоростью транспортного средства, учитывающий неопределённости системы, связанные с изменением массы. В таблице представлены три варианта массы транспортного средства:

Таблица 1 — Значение массы ТС в зависимости от количества пассажиров

Параметр	Значение	Количество пассажиров
Снаряженная масса (M1)	12220 кг	0
Средняя масса (M2)	14920 кг	40
Полная масса (M3)	18000 кг	85

Алгоритм активного управления с добавлением помех был разработан для регулирования скорости. Схема управления представлена на следующем рисунке:

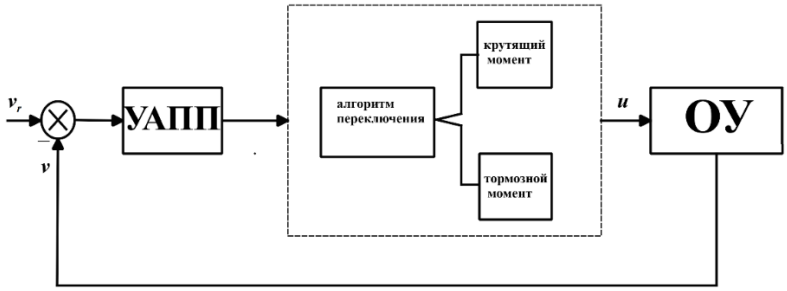


Рисунок 2 — Схема управления скоростью транспортного средства

В результатах моделирования отмечена устойчивость системы к изменениям динамики, как показано на рисунке 3.

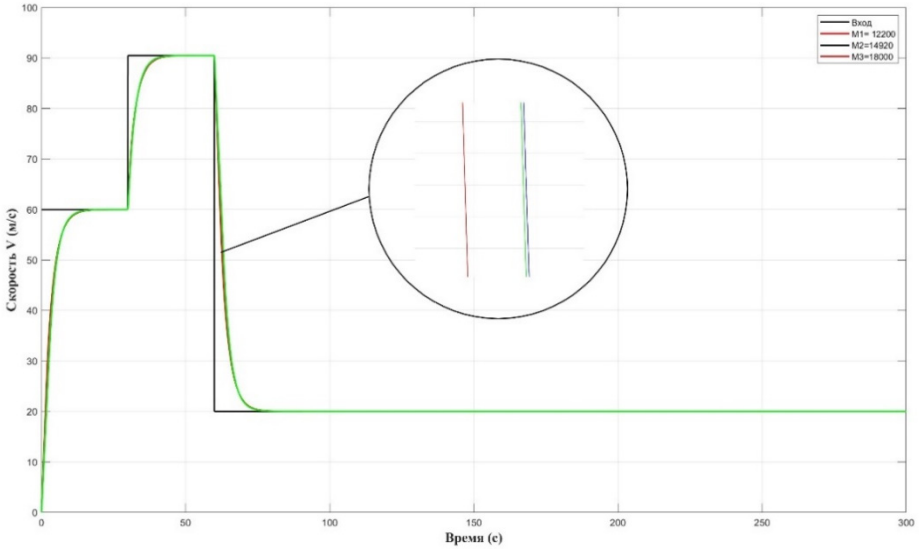


Рисунок 3 — Управление скоростью ТС в случае разных масс

Желаемая скорость показана ступенчатым воздействием. Из рисунка видно, что независимо от изменения массы транспортного средства, скорость достигается без изменения в управлении, поскольку метод обладает адаптивными свойствами.

Кроме того, при управлении скоростью и движением необходимо постоянно контролировать комфорт пассажиров, так как это считается основной задачей в управлении.

В [3][4][5] предлагаются алгоритмы управления комфортом пассажиров. Однако в этих работах изучается движение по дорогам типа D. Хотя если алгоритм работает на дорогах типа D, существует возможность его применения и на городских дорогах, а также в условиях пробок. Мы исследуем сходство движения в пробке с движением на дорогах типа D через измерение скорости и ускорения в режиме реального времени на обоих типах дорог. Затем проводится анализ временных рядов и вычисление спектральной плотности мощности (PSD) для этих данных, с последующим сравнением через корреляционную матрицу.

Эти методы позволяют количественно оценить и визуализировать сходство движения транспортных средств в различных условиях (пробка и дорога класса D) на основе их спектральных характеристик и статистических показателей.

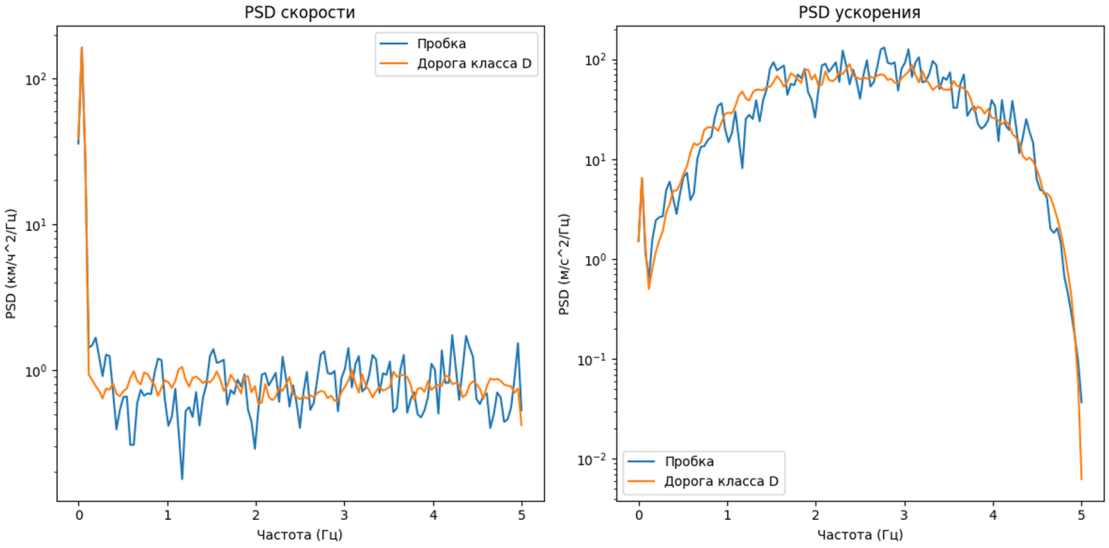


Рисунок 4 — Сравнение PSD для скорости и ускорения во время движения в пробке и на дороге типа D

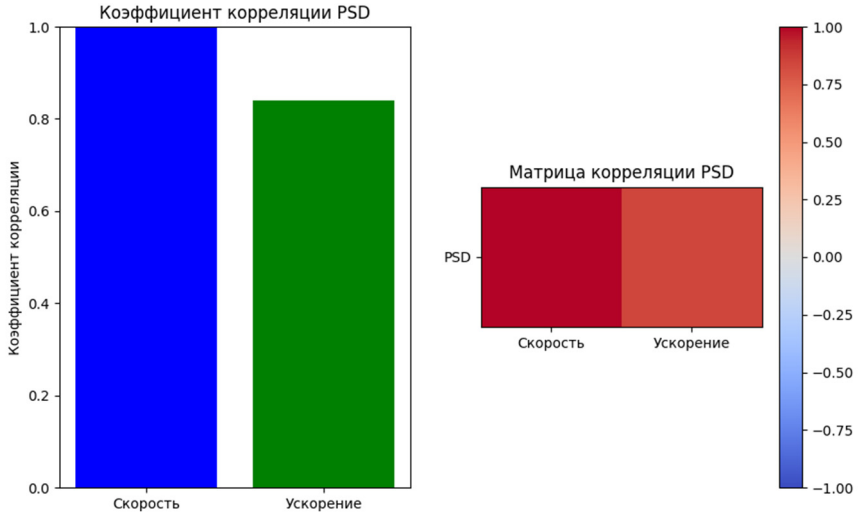


Рисунок 5 — Матрица корреляции движения

Из рисунка видно, что оба движения похожи: по скорости они почти совпадают (коэффициент корреляции близок к 1), а по ускорению — около 0,8. В таких условиях можно считать, что движение в пробке схоже с движением на дороге типа D. Поэтому необходимо поддерживать высокий уровень комфорта пассажиров в таких условиях, что требует создания модели транспортного средства для управления комфортом, связанной с системой подвески.

Модель типа «полная автомобиля» (МПА)

На рисунке 6. представлена модель транспортного средства (ТС) с активной подвеской, имеющая 7 степеней свободы. Для упрощения динамика ТС разделена на три части: уравнения неподрессоренной массы описывают вертикальные ускорения колес ТС с учетом прогибов подвески и дорожных возмущений; уравнения подрессоренной массы описывают вертикальное ускорение кузова ТС и угловые ускорения крена и тангажа; уравнения углов кузова описывают взаимосвязь между вертикальными смещениями кузова ТС в каждом углу и состояниями всей системы.

Уравнения неподрессоренной массы

$$\begin{aligned}
m_u \ddot{z}_{ufl} &= K_{sf}\left(z_{sfl}-z_{ufl}\right)+B_{sfl}\left(\dot{z}_{sfl}-\dot{z}_{ufl}\right)-K_u\left(z_{ufl}-z_{rfl}\right)-f_{fl}\\
m_u \ddot{z}_{ufr} &= K_{sf}\left(z_{sfr}-z_{ufr}\right)+B_{sfr}\left(\dot{z}_{sfr}-\dot{z}_{ufr}\right)-K_u\left(z_{ufr}-z_{rfr}\right)-f_{fr}\\
m_u \ddot{z}_{url} &= K_{sr}\left(z_{srl}-z_{url}\right)+B_{srl}\left(\dot{z}_{srl}-\dot{z}_{url}\right)-K_u\left(z_{url}-z_{rrl}\right)-f_{rl}\\
m_u \ddot{z}_{urr} &= K_{sr}\left(z_{srr}-z_{urr}\right)+B_{srr}\left(\dot{z}_{srr}-\dot{z}_{urr}\right)-K_u\left(z_{urr}-z_{rrr}\right)-f_{rr}
\end{aligned} \tag{1}$$

Уравнения углов шасси

$$\begin{aligned}
z_{sfl} &= w_f\phi+a\theta+z_s\\
z_{sfr} &= -w_f\phi+a\theta+z_s\\
z_{srl} &= w_r\phi-b\theta+z_s\\
z_{srr} &= -w_r\phi-b\theta+z_s
\end{aligned} \tag{2}$$

Уравнения подрессоренной массы.

$$\begin{aligned}
m_s\ddot{z}_s &= -K_{sf}\left(z_{sfl}-z_{ufl}\right)-K_{sf}\left(z_{sfr}-z_{ufr}\right)-K_{sr}\left(z_{srl}-z_{url}\right)-\ldots\\
&\quad K_{sr}\left(z_{srr}-z_{urr}\right)-B_{sfl}\left(\dot{z}_{sfl}-\dot{z}_{ufl}\right)-B_{sfr}\left(\dot{z}_{sfr}-\dot{z}_{ufr}\right)-\ldots.\\
&\quad B_{srl}\left(\dot{z}_{srl}-\dot{z}_{url}\right)-B_{srr}\left(\dot{z}_{srr}-\dot{z}_{urr}\right)+f_{fl}+f_{fr}+f_{rl}+f_{rr}\\
I_{yy}\ddot{\theta} &= -aK_{sf}\left(z_{sfl}-z_{ufl}\right)-aK_{sf}\left(z_{sfr}-z_{ufr}\right)+bK_{sr}\left(z_{srl}-z_{url}\right)\\
&\quad +bK_{sr}\left(z_{srr}-z_{urr}\right)-aB_{sfl}\left(\dot{z}_{sfl}-\dot{z}_{ufl}\right)-aB_{sfr}\left(\dot{z}_{sfr}-\dot{z}_{ufr}\right)+\\
&\quad bB_{srl}\left(\dot{z}_{srl}-\dot{z}_{url}\right)+bB_{srr}\left(\dot{z}_{srr}-\dot{z}_{urr}\right)+\ldots\\
&\quad +af_{fl}+af_{fr}-bf_{rl}-bf_{rr}\\
I_{xx}\ddot{\varphi} &= -w_fK_{sf}\left(z_{sfl}-z_{ufl}\right)+w_fK_{sf}\left(z_{sfr}-z_{ufr}\right)-w_rK_{sr}\left(z_{srl}-z_{url}\right)+\\
&\quad w_rK_{sr}\left(z_{srr}-z_{urr}\right)-w_fB_{sfl}\left(\dot{z}_{sfl}-\dot{z}_{ufl}\right)+w_fB_{sfr}\left(\dot{z}_{sfr}-\dot{z}_{ufr}\right)-\\
&\quad w_rB_{srl}\left(\dot{z}_{srl}-\dot{z}_{url}\right)+w_rB_{srr}\left(\dot{z}_{srr}-\dot{z}_{urr}\right)+\ldots\\
&\quad +w_ff_{fl}-w_ff_{fr}+w_rf_{rl}-w_rf_{rr}
\end{aligned} \tag{3}$$

Состояния системы назначаются, как показано в таблице (1), а параметры системы перечислены в таблице (2). Уравнения, состояния и параметры основаны на [3].

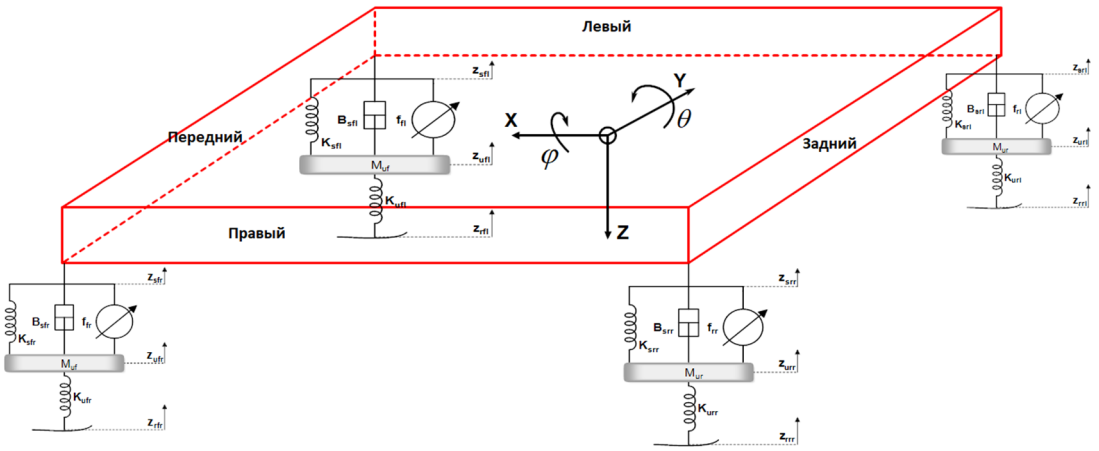


Рисунок 6 — Модель ТС с активной подвеской с 7 степенями свободы

Таблица 2 — Состояния системы и их обозначения для модели типа «полный автомобиль»

Состояние системы	Индикация
z	положение подъема (высота подъема подрессоренной массы)
θ	угол тангажа
φ	угол крена
z_{sfl}, z_{ufl}	высота подрессоренной / неподрессоренной массы переднего левого колеса
z_{sfr}, z_{ufr}	высота подрессоренной / неподрессоренной массы переднего правого колеса
z_{srl}, z_{url}	высота подрессоренной / неподрессоренной массы заднего левого колеса
z_{srr}, z_{urr}	высота подрессоренной / неподрессоренной массы заднего правого колеса

Таблица 3 — Параметры системы и их обозначения для модели типа «полный автомобиль»

Параметр	Индикация
m_s	Подрессоренная масса
m_u	Неподрессоренная масса
$K_{sf} = K_{sfl} = K_{sfr}$	жесткость пружины передней подвески
$K_{sr} = K_{srl} = K_{srr}$	жесткость пружины задней подвески
K_u	жесткость пружины шины
$B_{sf} = B_{sfl} = B_{sfr}$	демпфирование передней подвески
$B_{sr} = B_{srl} = B_{srr}$	демпфирование задней подвески
I_{xx}	момент инерции оси крена
I_{yy}	момент инерции оси тангажа

Основные задачи

Предлагаемые стратегии управления разработаны на платформе моделирования, основанной на микроконтроллере ARM с подключенными коммерческими датчиками, и предназначены для управления быстрыми активными подвесками.

Архитектура системы включает четыре типа датчиков: акселерометры, гироскопы, магнитометры и потенциометры. Все датчики соединены через сеть Ethernet, которая обеспечивает модульность архитектуры, позволяя подключать или отключать отдельные блоки управления без нарушения скорости передачи данных.

Используются четыре линейных потенциометра, по одному на каждой подвеске, а также набор из восьми трехосных MEMS-акселерометров: четыре установлены на колесах, а оставшиеся четыре — на раме кузова, рядом с шарниром подвески. Блок измерения инерции (IMU) с девятью степенями свободы, включающий трехосный акселерометр, гироскоп и магнитометр, размещен рядом с центром тяжести автомобиля. Четыре датчика на раме выполняют двойную функцию: измеряют вертикальные ускорения вблизи мест подвешивания и помогают оценить общее положение транспортного средства. Четыре трехмерных ускорения, полученные с четырех углов, передаются в IMU для более точной оценки тангажа и крена.

В случае нехватки информации о динамике системы, датчик IMU с 9 степенями свободы будет использоваться для оценки углов тангажа, рыскания и крена с применением алгоритма градиентного спуска. Четыре потенциометра, установленные на каждом углу ТС, будут измерять отклонения подвески. Акселерометры на каждом колесе и соответствующем угловом шасси будут использоваться для оценки коэффициента динамической нагрузки (Dynamic Load Coefficient, DLC) каждого колеса.

Это достигается следующим образом: исходя из динамических уравнений системы типа «четверть автомобиля» и последовательно их суммируя, мы получаем соответствующее уравнение.

$$\left.\begin{aligned} \frac{m_s}{4}\ddot{z}_{si} &= -K_{si}z_{si} - C_{si}\dot{z}_{si} + u_i \\ m_{ui}\ddot{z}_{ui} &= K_{si}z_{si} + C_{si}\dot{z}_{si} - K_u\left(z_{ui} - z_{ri}\right) - u_i \end{aligned}\right\} \Rightarrow$$

$$\frac{m_s}{4}\ddot{z}_{si} + m_u\ddot{z}_{ui} = -K_u\left(z_{ui} - z_{ri}\right);\quad i \in \{fl, fr, rl, rr\}. \tag{4}$$

В результате

$$DLC_i = RMS\left(\frac{K_u(z_{ui} - z_{ri})}{(m_{si} + m_u)g}\right) = RMS\left(-\frac{(m_s/4)\ddot{z}_{si} + m_u\ddot{z}_{ui}}{((m_s/4) + m_u)g}\right) \tag{5}$$

На рисунке 7 показана схема извлечения данных для управления с обратной связью

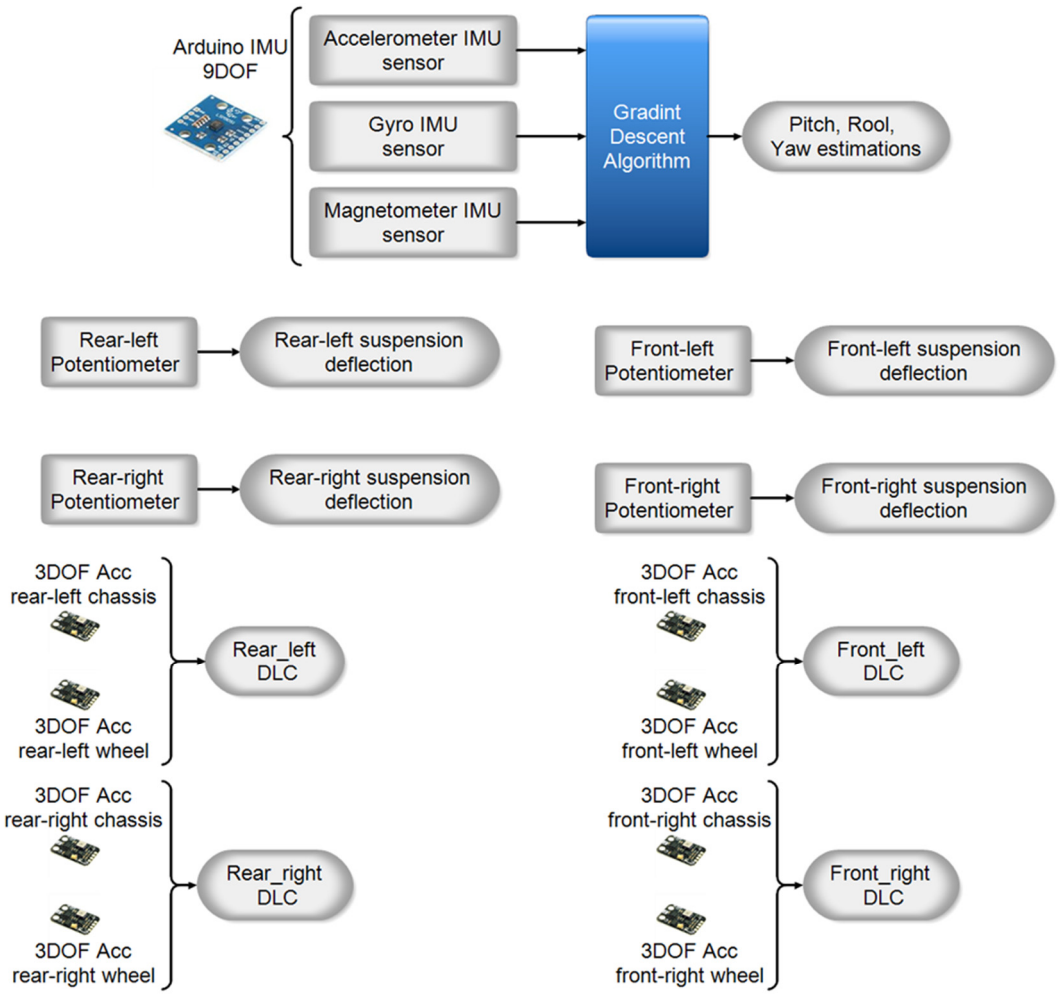


Рисунок 7 — Схема извлечения данных

Комфорт и управляемость можно описать с помощью ускорения подъема центра тяжести транспортного средства и угла крена соответственно. Степень комфорта оценивается как в уравнении (6).

$$\sigma_1 = RMS(\ddot{z}_s) \tag{6}$$

где $\ddot{z}_s$ - ускорение подрессоренной массы всего кузова транспортного средства.

Степень управляемости оценивается с использованием следующего предложенного критерия:

$$\sigma_2 = \sqrt{\int_{0Hz}^{20Hz} S_\varphi} \times \frac{\sum_{i=1}^{4} DLC_i}{4} \tag{7}$$

где DLC_i представляет DLC в i углу автомобиля, а S_φ является спектральной плотностью мощности (Power spectral density (PSD)) угла крена.

Схема линейного АУПП (ЛАУПП) второго порядка

Структура ЛАУПП основана на обобщенной стратегии АУПП [5]. На рисунке 8 показаны компоненты структуры ЛАУПП второго порядка.

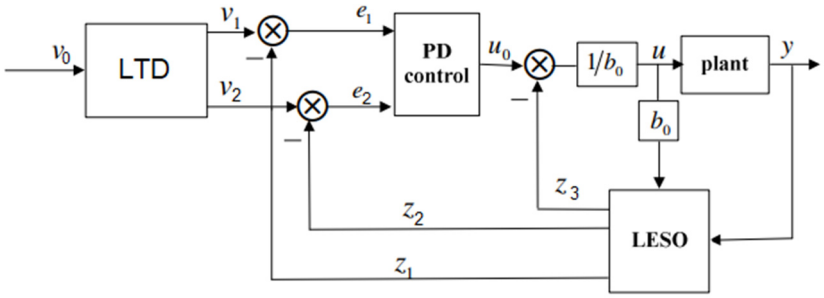


Рисунок 8 — Компоненты структуры ЛАУПП второго порядк

УАПП (Управляющая автоматическая платформа процесса) состоит из двух основных контуров: контура обратной связи и контура оценки. Она включает четыре основных блока: регулятор, линейный расширенный наблюдатель состояния (ЛРНС), линейный следящий дифференциатор (ЛСД) и схему удаления помех.

Линейный следящий дифференциатор (ЛСД)

Линейный следящий дифференциатор (ЛСД) используется для сглаживания требуемого сигнала и генерации выходных сигналов, которые отслеживают как требуемый сигнал, так и его производную. Алгоритм работы ЛСД представлен следующим образом:

$$\begin{aligned} \dot{v}_1 &= v_2 \\ \dot{v}_2 &= -k_1(v_1 - v_0) - k_2 v_2, \end{aligned} \tag{8}$$

где v_0 - это требуемый сигнал, v_1 - это сигнал отслеживания системы, а v_2 - это дифференциальный сигнал системы. k_1, k_2 - настраиваемые параметры ЛСД. Когда $k_1 = r^2, k_2 = 2r, r > 0,$ перерегулирование отсутствует и время переходного процесса составляет примерно $T_0 = 7 / r$, где r - коэффициент скорости.

Линейный расширенный наблюдатель состояния (ЛРНС)

Идея расширенного наблюдателя состояний (РНС) заключается в том, что получить информацию об обобщенных возмущениях (неопределенностях и внешних возмущениях $\hat{f}$ и внутренней динамике системы $\hat{y}, \hat{\dot{y}}$). Динамику системы можно представить в общем виде:

$$\ddot{y} = g(t, y, \dot{y}) + b_0 u + w, \tag{9}$$

где y-выходной сигнал, u-управление, g(.) – функция, описывающая динамику объекта (включая неизвестную динамику), w-внешнее возмущение, а b_0-коэффициент системы. Компоненты динамики системы (g(.), b_0, w) обычно точно не известны. Объединив внешние и внутренние возмущения в одной функции f(.), систему можно представить в виде:

$$\ddot{y} = f(t, y, \dot{y}, w) + b_0 u \tag{10}$$

Уравнение (3) можно записать в пространстве состояний в виде:

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= x_2\\ \dot{x}_2 &= f + b_0 u\\ y &= x_1\end{aligned} \tag{11}$$

Общее возмущение добавляется к состояниям следующим образом:

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= x_2\\ \dot{x}_2 &= x_3 + au\\ \dot{x}_3 &= \dot{f}(t, x_1, x_2, w)\\ y &= x_1\end{aligned} \tag{12}$$

Это может быть выражено в пространстве состояний, как:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= A_x x + B_x u + E_x \dot{f}\\ y &= C_x x,\end{aligned} \tag{13}$$

где:

$$A_x = \begin{bmatrix}0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 1\\ 0 & 0 & 0\end{bmatrix},\quad B_x = \begin{bmatrix}0\\ b_0\\ 0\end{bmatrix}\quad C_x = \begin{bmatrix}1 & 0 & 0\end{bmatrix},\quad E_x = \begin{bmatrix}0\\ 0\\ 1\end{bmatrix} \tag{14}$$

Линейный РНС (ЛРНС) может использоваться для наблюдения состояний x_1, x_2, x_3. Таким образом, ЛРНС может быть представлен как:

$$\begin{aligned}\dot{z}_1 &= z_2 - \alpha_1 \hat{e}\\ \dot{z}_2 &= z_3 + \widehat{b_0} u - \alpha_2 \hat{e}\\ \dot{z}_3 &= -\alpha_3 \hat{e},\end{aligned} \tag{15}$$

где z_1, z_2 и z_3 - аппроксимированные значения состояний x_1, x_2 и x_3 соответственно, α_1, α_2 и α_3 коэффициенты наблюдателя, и $\hat{e} = y - z_1$ - это оценка ошибки, $\widehat{b_0}$-это аппроксимированное значение для b_0 в уравнении (1) и оно может быть выбрано в этой структуре эмпирически.

Наблюдаемые переменные ($\hat{y} = z_1, \dot{\hat{y}} = z_2, \hat{f} = z_3$) помимо аппроксимированного значения $\widehat{b_0}$ затем используются для удаления возмущения и управления системой, как показано на рисунке 8.

Схема удаления помех

Схема подавления помех может быть определена как:

$$u = \frac{u_0 - z_3}{\widehat{b_0}} = \frac{u_0 - \hat{f}}{\widehat{b_0}}, \tag{16}$$

где u_0 - выход регулятора.

Возвращаемся к уравнению (10) и заменяем u на его расчетное значение:

$$\ddot{y} = f(.) + b_0 \left(\frac{u_0 - \hat{f}}{\widehat{b_0}}\right) \tag{17}$$

Если наблюдение было достаточно хорошо, чтобы считать, что $\widehat{b_0} \approx b_0$ и $\hat{f} \approx f$ то динамическое уравнение можно записать как:

$$\ddot{y} \approx u_0 \tag{18}$$

Регулятор обратной связи

Если в качестве регулятора обратной связи используется пропорционально- дифференциальный (ПД) регулятор, то управляющий сигнал u_0 можно записать в виде:

$$u_0(t) = K_p(y_{ref} - \hat{y}) + K_d\dot{\hat{y}} \tag{19}$$

Коэффициенты ПД могут быть выбраны как:

$$K_p = w_{CL}^2, \quad K_d = -2\xi w_{CL}, \tag{20}$$

где w_{CL} - желаемый полюс замкнутой системы, а ξ - желаемый коэффициент демпфирования замкнутого система. Полюса наблюдателя, w_{ESO} должны быть помещены n раз слева от полюса замкнутого цикла, чтобы гарантировать, что динамика наблюдателя достаточно быстра, где $n \in [3,10]$ т.е:

$$w_{ESO} = nw_{CL} \tag{21}$$

Здесь все полюса наблюдателя размещены в одном месте для простоты. Это означает, что характеристическое уравнение наблюдателя будет:

$$D(\lambda) = (\lambda - w_{ESO})^3 = \lambda^3 - 3w_{ESO}\lambda^2 - 3w_{ESO}^2\lambda - w_{ESO}^3 \tag{22}$$

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ вычисляются путем решения уравнения:

$$D(\lambda) = |\, sI - A_x + LC_x \,|, \tag{23}$$

где:

$$I = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad L = \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \end{bmatrix} \tag{24}$$

В результате коэффициенты наблюдателя выбираются в виде:

$$\alpha_1 = -3w_{ESO}, \quad \alpha_2 = -3w_{ESO}^2, \quad \alpha_3 = -w_{ESO}^3 \tag{25}$$

Подход оптимизированного АУПП

Для обеспечения комфорта, если алгоритм управления направлен на минимизацию вертикального смещения подпружиненной массы z_s, вертикальное ускорение также будет сведено к минимуму, обеспечивая необходимый комфорт. Таким образом, вопрос о компромиссе между степенью управляемости и комфортом может быть истолкован как компромисс между смещением z_s и углом крена φ.

Таким образом, функция качества, которая должна быть оптимизирована для системы подвески, определяется следующим образом.

$$J = \int_0^{T_p} \left[(1-\rho)(\varphi(t+\tau))^2 + \rho(z_s(t+\tau))^2 \right] d\tau \tag{26}$$

где T_p - период, в течение которого продолжается оптимизация, $z_s(t+\tau)$ - будущий тяжелый момент времени τ, $\varphi(t+\tau)$ - будущий бросок. Будущие значения предсказываются расширением ряда Тейлора.

$$\begin{aligned} z_s(t+\tau) &\approx z_s(t) + \tau\dot{z}_s(t) + \frac{\tau^2}{2}\ddot{z}_s(t) \\ \varphi(t+\tau) &\approx \varphi(t) + \tau\dot{\varphi}(t) + \frac{\tau^2}{2}\ddot{\varphi}(t) \end{aligned} \tag{27}$$

Оценки выходных производных вторых степеней выводятся из основного динамического уравнения системы, управляемой АУПП.

$$\begin{aligned}\hat{\ddot{z}}_s &= b_z\hat{u}_z + \hat{f}_z \\ \hat{\ddot{\varphi}} &= b_\varphi\hat{u}_\varphi + \hat{f}_\varphi\end{aligned} \tag{28}$$

Подставляя уравнение (24) в уравнение (23), мы получаем.

$$\begin{aligned}\hat{z}_s(t+\tau) &\approx \mathcal{T}(\tau)(\hat{X}_z + \hat{U}_z) \\ \hat{\varphi}(t+\tau) &\approx \mathcal{T}(\tau)(\hat{X}_\varphi + \hat{U}_\varphi)\end{aligned} \tag{29}$$

где:

$$\mathcal{T} = \left[1 \quad \tau \quad \frac{\tau^2}{2}\right], \hat{X}_z = \left[z_s \quad \dot{z}_s \quad \hat{f}_z\right]^T, \hat{U}_z = \left[0 \quad 0 \quad b_z\hat{u}_z\right]^T$$

$$\text{и } \hat{X}_\varphi = \left[\varphi \quad \dot{\varphi} \quad \hat{f}_\varphi\right]^T, \hat{U}_\varphi = \left[0 \quad 0 \quad b_\varphi\hat{u}_\varphi\right]^T$$

В результате общая функция оценки качества может быть записана следующим образом.

$$J = \int_0^{T_p} \rho[\mathcal{T}(\tau)(\hat{X}_z + \hat{U}_z)]^2 + (1-\rho)[\mathcal{T}(\tau)(\hat{X}_\varphi + \hat{U}_\varphi)]^2 d\tau \tag{30}$$

Упрощение уравнения (26) приводит к следующему.

$$J = \frac{\rho}{2}[\hat{X}_z^T + \hat{U}_z^T]\mathcal{T}_s[(\hat{X}_z + \hat{U}_z)] + \frac{1-\rho}{2}[\hat{X}_\varphi^T + \hat{U}_\varphi^T]\mathcal{T}_s[\hat{X}_\varphi^T + \hat{U}_\varphi] \tag{31}$$

где

$$\mathcal{T}_s = \int_0^{T_p} \mathcal{T}^T(\tau)\mathcal{T}(\tau)d\tau = \begin{bmatrix} T_p & \frac{T_p^2}{2} & \frac{T_p^3}{6} \\ \frac{T_p^2}{2} & \frac{T_p^3}{3} & \frac{T_p^4}{8} \\ \frac{T_p^3}{6} & \frac{T_p^4}{8} & \frac{T_p^5}{20} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \tag{32}$$

Определяя $\hat{X}_{1z} = [z_s, \dot{z}_s]^T, \hat{X}_{2z} = \hat{f}_z, \hat{U}_{2z} = b_z\hat{u}_z$, $\hat{X}_{1\varphi} = [\varphi, \dot{\varphi}]^T, \hat{X}_{2\varphi} = \hat{f}_\varphi, \hat{U}_{2\varphi} = b_\varphi\hat{u}_\varphi$ общая функция оценки качества может быть записана следующим образом.

$$\begin{aligned} J = &\frac{\rho}{2}\begin{pmatrix}\hat{X}_{1z}^T & \hat{X}_{2z}^T + \hat{U}_{2z}^T\end{pmatrix}\begin{pmatrix}T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22}\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\hat{X}_{1z} \\ \hat{X}_{2z} + \hat{U}_{2z}\end{pmatrix} + \ldots \\ &+ \frac{1-\rho}{2}\begin{pmatrix}\hat{X}_{1\varphi}^T & \hat{X}_{2\varphi}^T + \hat{U}_{2\varphi}^T\end{pmatrix}\begin{pmatrix}T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22}\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\hat{X}_{1\varphi} \\ \hat{X}_{2\varphi} + \hat{U}_{2\varphi}\end{pmatrix}\end{aligned} \tag{33}$$

Следовательно, частичная производная функции качества по отношению к усилиям по регулированию будет.

$$\begin{aligned}\frac{\partial J}{\partial \hat{U}_{2z}} &= \frac{\rho}{2}\left(T_{12}^T\hat{X}_{1z} + T_{22}^T\hat{X}_{2z} + T_{21}\hat{X}_{1z} + T_{22}\hat{X}_{2z} + 2T_{22}\hat{U}_{2z}\right) \\ \frac{\partial J}{\partial \hat{U}_{2\varphi}} &= \frac{1-\rho}{2}\left(T_{12}^T\hat{X}_{1\varphi} + T_{22}^T\hat{X}_{2\varphi} + T_{21}\hat{X}_{1\varphi} + T_{22}\hat{X}_{2\varphi} + 2T_{22}\hat{U}_{2\varphi}\right)\end{aligned} \tag{34}$$

Отмечая, что $T_{12}^T = T_{21}, T_{22}^T = T_{22}$, последнее выражение можно упростить до следующего.

$$\frac{\partial J}{\partial \hat{U}_{2z}} = \rho\left(T_{21}\hat{X}_{1z} + T_{22}(\hat{X}_{2z} + \hat{U}_{2z})\right)$$
$$\frac{\partial J}{\partial \hat{U}_{2\varphi}} = (1-\rho)\left(T_{21}\hat{X}_{1\varphi} + T_{22}(\hat{X}_{2\varphi} + \hat{U}_{2\varphi})\right) \quad (35)$$

если управляющий сигнал рассчитан на то, чтобы быть $\hat{U}_2 = \begin{bmatrix} \rho\hat{U}_{2z} \\ (1-\rho)\hat{U}_{2\varphi} \end{bmatrix}$, оптимизированный закон управления выводится путем $\frac{\partial J}{\partial \hat{U}_2} = 0$, т.е.

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial J}{\partial \hat{U}_{2z}} = 0 \\ \frac{\partial J}{\partial \hat{U}_{2\varphi}} = 0 \end{bmatrix}$$

И таким образом.

$$T_{22}\hat{U}_{2z} = -T_{21}\hat{X}_{1z} - T_{22}\hat{X}_{2z}$$
$$T_{22}\hat{U}_{2\varphi} = -T_{21}\hat{X}_{1\varphi} - T_{22}\hat{X}_{2\varphi} \quad (36)$$

Это приводит к следующему закону управления.

$$\hat{U}_{2z} = -\left(T_{22}\right)^{-1} T_{21}\hat{X}_{1z} - \hat{X}_{2z}$$
$$\hat{U}_{2\varphi} = -\left(T_{22}\right)^{-1} T_{21}\hat{X}_{1\varphi} - \hat{X}_{2\varphi} \quad (37)$$

В конечном результате закон управления, применяемый к подъему и крену соответственно, определяется следующим уравнением:

$$u_i = -\frac{1}{\hat{b}_{0i}}(K_{pi}(y_i - y_{ri}) + K_{di}\hat{\dot{y}}_i + \hat{f}_i),\ i = \{z, \varphi\} \quad (38)$$

где

$$K_{pz} = K_{p\varphi} = \frac{10}{3T_p^2};\quad K_{dz} = K_{d\varphi} = \frac{5}{2T_p} \quad (39)$$

Полюс замкнутого контура и коэффициент демпфирования системы, управляемой АУПП, могут быть рассчитаны следующим образом.

$$K_p = w_{CL}^2,\ K_d = 2\xi w_{CL} \Rightarrow$$
$$-w_{CL} = -\sqrt{K_p},\ \xi = 0.5\frac{K_d}{\sqrt{K_p}} \quad (40)$$

Следовательно, характеристическое уравнение всей системы будет $\Delta(s) = s^2 + K_d s + K_p$ и он всегда будет стабильным по Гурвицу, если $K_p, K_d > 0$. Это всегда верно, если $T_p > 0$.

Если закон управления АУПП петлями подъема и крена выбран, как в уравнении (38), коэффициенты управления, как в уравнении (39), и коэффициенты наблюдателя, как в уравнении (40), то общая система всегда будет стабильной. В этом случае мы предполагаем, что контур угла тангажа управляется другим регулятором АУПП, параметры которого выбираются эмпирически. На Рис.9 показана схема системы с замкнутым контуром.

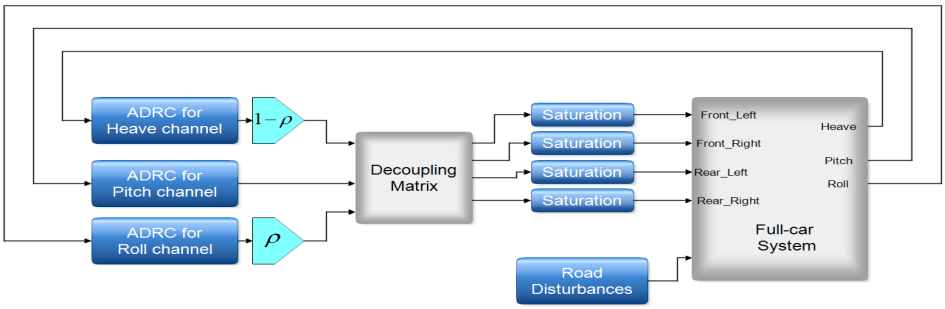


Рисунок 9 — Схема модели типа «полный автомобиль» с системой подвески, управляемой оптимизированным-АУПП

Механизм распределения управления представляет собой матрицу развязки, которая принимает в качестве входных данных: стабилизирующие силы подъема, тангажа и крена. Этот механизм выдает управляющие силы для подвесок четырех углов автомобиля. Учитывая уравнение (3), механизм распределения контроля может быть выражен следующим образом.

$$K = Pinv\left(\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ a & a & -b & -b \\ w_f & -w_f & w_r & -w_r \end{bmatrix}\right) \tag{41}$$

где $Pinv$ относится к псевдоинверсной матрице.

Результаты моделирования

Испытание предлагаемой стратегии управления проводилось при следующих условиях: дорожные помехи описаны стандартом ISO 8608 для дорог класса D, а скорость транспортного средства изменяется от 20 км/ч до 70 км/ч. В ходе испытания вычислялись спектральная плотность мощности (Power Spectral Density, PSD) ускорения подрессоренной массы и PSD угла крена за 1000 секунд работы. На основе этих данных были определены показатели комфорта и степени управляемости согласно уравнениям (6) и (7) соответственно.

На первом этапе исследования анализировалось изменение индекса комфорта и индекса степени управляемости в зависимости от коэффициента управления при фиксированной скорости автомобиля в 54 км/ч. По окончании этого этапа было определено балансовое значение коэффициента, которое обеспечивает оптимальный компромисс между комфортом и степенью управляемости.

На втором этапе оценивалось изменение индекса комфорта и индекса степени управляемости при варьировании скорости автомобиля, при этом коэффициент управления оставлялся на найденном балансовом значении. Согласно стандарту ISO 2631-1, поездка считается комфортной, если среднеквадратичное значение ускорения подрессоренной массы составляет менее 0,31. В соответствии с нашим новым критерием, степень управляемости считается хорошей, если индекс меньше 3,00 × 10^−4.

В Таблице 4 представлены изменения значений индекса комфорта и индекса степени управляемости в зависимости от коэффициента управления p.

Таблица 4 — изменение значений индекса комфорта и индекса степени управляемости в зависимости от коэффициента управления p

ρ	индекс комфорта	индекс степени управляемости
0.1	0.1653	5.00×10^{-4}
0.2	0.1786	3.14×10^{-4}
0.3	0.1921	2.33×10^{-4}
0.4	0.2051	1.48×10^{-4}
0.5	0.2164	1.51×10^{-4}
0.6	0.2243	1.26×10^{-4}
0.7	0.2287	1.08×10^{-4}
0.8	0.2566	0.96×10^{-4}
0.9	0.5153	1.04×10^{-4}

На рисунке 10 показаны нормализованные значения индекса комфорта и индекса управляемости в диапазоне [0,1]. Можно видеть, что $\rho = 0.4$ - хороший компромисс. Теперь, выбрав $\rho = 0.4$, мы можем изучить изменение индекса комфорта и индекса степени управляемости в результате изменения скорости автомобиля. В Таблице.5 показано изменение значений индекса комфорта и индекса степени управляемости при изменении скорости автомобиля.

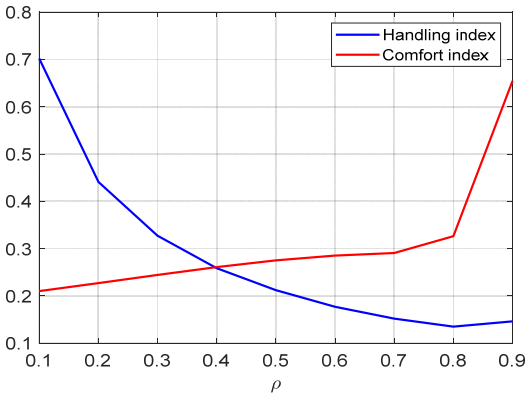


Рисунок 10 — нормализованные значения индекса комфорта и индекса управляемости в диапазоне [0,1]

Таблица 5 — Индекс комфорта и индекс степени управляемости при изменении скорости автомобиля

Скорость автомобиля	**индекс комфорта**		**индекс степени управляемости**	
	Активный	Пассивный	Активный	Пассивный
20	0.1248	0.4169	0.68×10^{-4}	4.82×10^{-4}
30	0.1529	0.5106	1.02×10^{-4}	7.23×10^{-4}
40	0.1765	0.5896	1.36×10^{-4}	9.65×10^{-4}
50	0.1974	0.6592	1.70×10^{-4}	12.0×10^{-4}
60	0.2162	0.7221	2.04×10^{-4}	14.0×10^{-4}
70	0.2341	0.7800	2.42×10^{-4}	17.0×10^{-4}
80	0.2511	0.8338	2.89×10^{-4}	19.0×10^{-4}
90	0.2669	0.8844	3.45×10^{-4}	22.0×10^{-4}
100	0.2868	0.9323	4.26×10^{-4}	24.0×10^{-4}

Из таблицы 5 видно, что предложенный алгоритм отлично работает до скорости автомобиля 80 км/ч. С другой стороны, езда на этом автомобиле в таких условиях будет опасна для пассивной системы на скорости более 30 км/ч. Можно сказать, что с помощью этого алгоритма можно переключаться между различными режимами работы, изменяя один коэффициент.

Заключение

Полученные результаты, представленные в таблице, показывают, что для каждого уровня скорости существует определенная величина комфорта, которую можно регулировать с помощью одного параметра, найденного в результате оптимизации алгоритма управления. В итоге, алгоритм работает следующим образом: желаемая скорость определяется в зависимости от расстояния до объектов, которое можно оценить с помощью датчиков. Во время управления скоростью также определяется требуемый уровень комфорта, как указано в таблице 5.

Литературы

1. Я. Вассуф, В. В. Серебренный, Е. А. Яковлева. Усовершенствованные системы помощи водителю для общественного транспорта // Наука, технологии и бизнес 2022 : Материалы IV Межвузовской конференции аспирантов, соискателей и молодых ученых, Москва, 27–28 апреля 2022 года. – Москва: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2022. – с. 333-346.

2. В. Язан, А. В. Тарасенко, Д. Осин, В. В. Серебренный // Метод управления скоростью в системах помощи водителю с использованием активного управления подавлением помех. Вестник МГТУ "Станкин". – 2024. – № 1(68). – С. 8-16.

3. М. Алхелу, Я. Вассуф, М. В. Коржуков [и др.] Управление активной подвеской автомобиля для обеспечения компромисса между степенью демпфирования и управляемости // Проблемы управления. – 2023. – № 1. – С. 45-58. – DOI 10.25728/pu.2023.1.5.

4. Вассуф, Я [и др] . Разработка системы круиз-контроля для общественного транспорта // Наука и бизнес: пути развития. – 2023. – № 12(150). – С. 77-80.

5. Алхелу М. и др. АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ КОМПРОМИССОМ МЕЖДУ УПРАВЛЯЕМОСТЬЮ И КОМФОРТОМ В МОДЕЛИ ТИПА «ЧЕТВЕРТЬ АВТОМОБИЛЯ» //Проблемы управления. – 2022. – №. 2. – С. 36-48.

Моделирование мобильного робота «ЛИРС-ArtBul-2» в симуляторе Gazebo

А.А. Апурин✉, Е.А. Магид
Казанский федеральный университет (КФУ), г. Казань, Россия, aaa@it.kfu.ru

Аннотация
Повышение мобильности робота в ограниченном пространстве или в присутствии большого количества людей является важной задачей. Для обеспечения высокой гибкости передвижения в любом направлении, которая позволит мобильному роботу успешно передвигаться в плотно застроенных или динамичных пространствах, можно использовать колеса Илона. В этой статье представлена разработка виртуальной модели мобильного робота «ЛИРС-ArtBul-2» для симулятора Gazebo. Для имитации движения робота «ЛИРС-ArtBul-2» были реализованы колёса со свободно вращающимися роликами. Был разработан контроллер для «ЛИРС-ArtBul-2» с колёсами Илона, который позволяет управлять роботом, публикуя данные о линейной скорости по осям X и Y, и угловой скорости по оси Z. Открытый исходный код может быть модифицирован для платформ с аналогичной структурой и доступен для загрузки через сервис GitLab.

Ключевые слова
Мобильный робот, колёса Илона, Gazebo, ROS.

Благодарности
Работа выполнена за счет средств Программы стратегического академического лидерства Казанского (Приволжского) федерального университета.

«LIRS-Artbul-2» mobile robot modelling for Gazebo simulator

Artem A. Apurin✉, Evgeni A. Magid
Kazan Federal University, Kazan, Russia, aaa@it.kfu.ru

Abstract
The enhancement of robot mobility in confined spaces or in a presence of large crowds of people is a critical challenge. To negotiate with dense and dynamic obstacles, mecanum wheels could be considered due to their ability to provide high maneuverability in any direction. This paper presents a virtual model development of a mecanum wheels' mobile robot «LIRS-ArtBul-2» for the Gazebo simulator. To simulate the robot's motion, wheels with freely rotating rollers were modelled. A controller for the «LIRS-ArtBul-2» robot was developed, enabling the robot control by publishing data on linear velocities along the X and Y axes, and angular velocity around the Z axis. An open-source code can be modified for platforms with a similar structure and is available via GitLab service.

Key words
Mobile robot, Mecanum wheels, Gazebo, ROS.

Acknowledgements
This paper has been supported by the Kazan Federal University Strategic Academic Leadership Program («PRIORITY-2030»).

Введение

За последнее десятилетие мобильные роботы с возможностями всенаправленного движения стали широко распространены в различных областях человеческой жизнедеятельности [1]. Эти мобильные платформы широко используются в автономном вождении [2], производстве [3], промышленности [4], медицине [5], социальной робототехнике [6], образовании [7] и других областях. Всенаправленное движение – это способность подвижного объекта перемещаться в любом желаемом направлении и с любой пространственной ориентацией [8]. Для такого передвижения робот может использовать специальные колеса, называемые колёсами Илона [9], которые обеспечивают роботу преимущество с точки зрения маневренности в узких пространствах [10].

Перед этапом сборки физического прототипа нового робота важно воспроизвести поведение робота в виртуальной среде, чтобы принять решение о его эффективности или попытаться улучшить физические и механические характеристики. Предпочтение отдается стандартным симуляторам (например, Gazebo [11], Webots [12] или CoppeliaSim [13]), в то время как использование симуляторов с высоким уровнем абстракции или разработка собственного симуляторов уже считаются достаточно устаревшими подходами.

В данной статье представлена разработка виртуальной модели мобильного робота с четырьмя колёсами Илона «ЛИРС-АртБул-2» в симуляторе Gazebo под робототехническую операционную систему ROS, созданного на базе всенаправленного шасси, которое ранее было представлено в нашей работе [14]. В каждой модели колеса Илона – восемь свободно вращающихся роликов цилиндрической формы, которые обеспечивают возможность всенаправленного движения. Управление движением модели робота в Gazebo осуществляется с помощью программного механизма ROS controller_manager и разработанного нами плагина mecanum_drive_controller, который конфигурируется для различных задач.

Моделирование мобильного робота

Для достижения высокого качества модели важно учитывать все параметры и особенности реального робота при создании его виртуального представления для симулятора. Основной задачей была разработка модели робота на колёсах Илона с пассивными свободно вращающимися роликами. Модели были сделаны с помощью программного обеспечения Blender. Визуальная и коллизионная модели ролика показаны на рисунке 1.

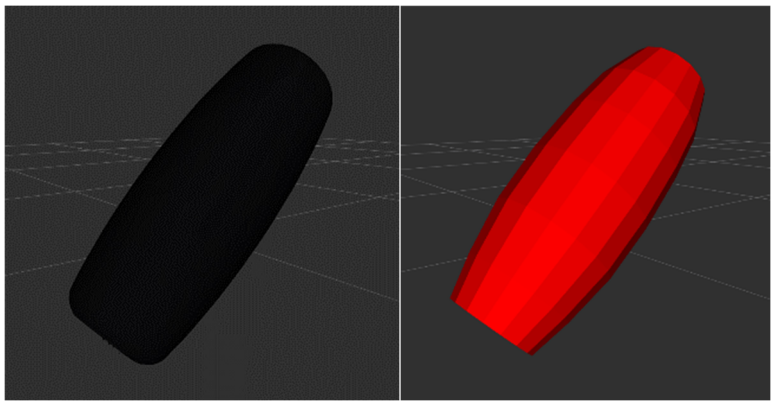


Рисунок 1 — Модель ролика колеса в RViz: визуальная (слева) и коллизионная модель(справа)

Для снижения сложности расчетов коллизий и повышения отношения времени симуляции к реальному времени (англ. «real time factor», RTF) следует использовать низкополигональные модели. Поэтому было сделано две модели ролика колеса: визуальная и коллизионная. Визуальная часть содержит 7708 полигонов, а коллизионная – 220, и это позволило увеличить RTF до 0,95-0,97. Модель колеса в Gazebo изображена на рисунке 2, каждый ролик находится на своей оси вращения и может свободно вращаться вокруг нее в пассивном режиме.

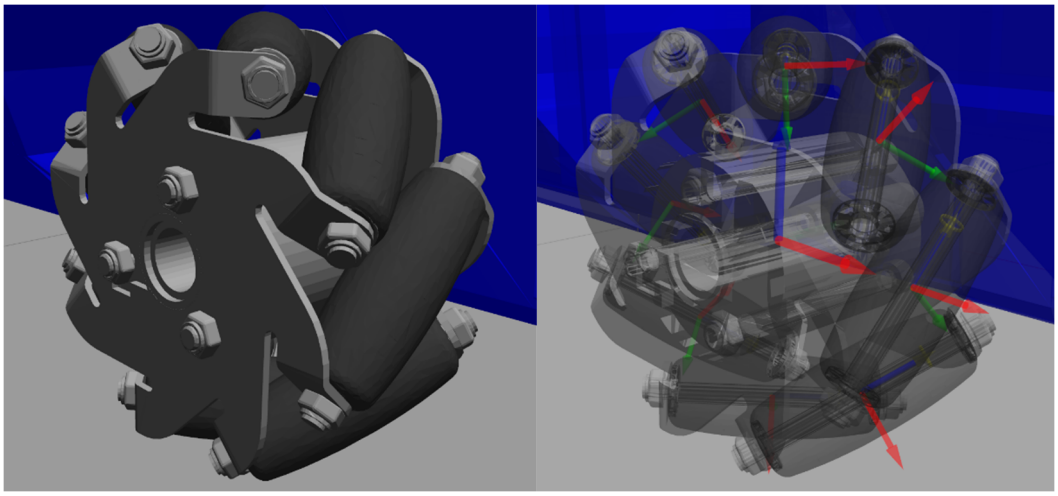


Рисунок 2 — Модель колеса в симуляторе Gazebo

Для того, чтобы ролики имели возможность свободно вращаться, в *URDF* описании робота тип сочленений был задан как *continuous* без ограничений, и в конфигурационном YAML файле контроллеров все сочленения роликов были добавлены в поле *extra joints* пакета *joint_state_broadcaster*. В таком случае положения роликов будут строго зафиксированы по всем осям, кроме указанной для вращения, и пакет *joint_state_broadcaster* не будет рассчитывать положение роликов. Это также снижает негативное влияние на RTF симуляции. Мобильный робот с колесами Илона в Gazebo показано на рисунке 3.

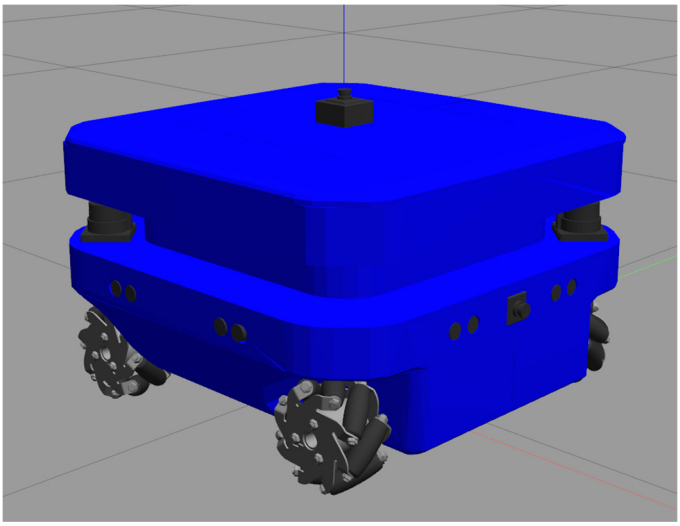


Рисунок 3 — Модель робота в Gazebo

Для возможности автономной навигации были добавлены два лазерных дальномера, инерциальные датчики (IMU), сонары и камеры. Был подключен пакет навигации *navigation_stack*, который позволяет роботу локализовываться, строить карту и автономно следовать по заданному пути. На рисунке 4 изображена модель робота в симуляторе Gazebo с датчиками и подключенным пакетом навигации.

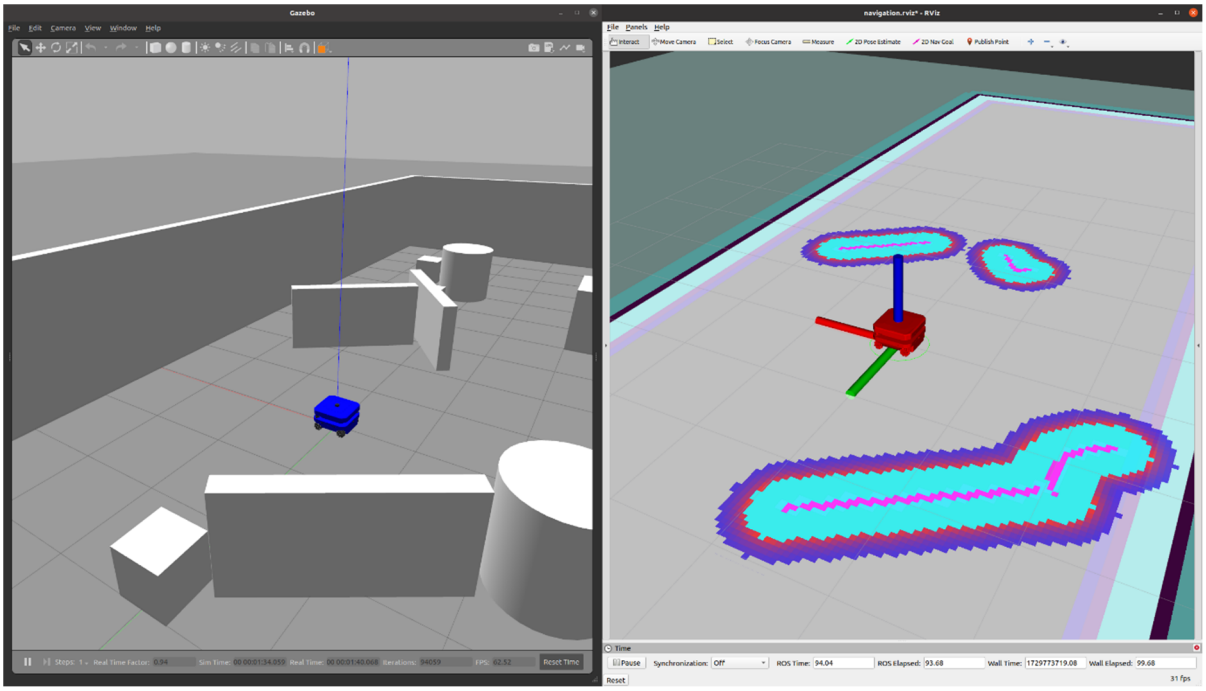


Рисунок 4 — Модель робота с пакетом навигации в Gazebo

Контроллер для робота с колёсами Илона

Для управления роботом в Gazebo был разработан контроллер, который подходит для всех мобильных роботов с четырьмя колёсами Илона. Управление роботом осуществляется с помощью публикации в ROS-топик */cmd_vel* сообщений с линейными скоростями по осям X и Y, и угловой скоростью по оси Z. Из полученных сообщений скорости колес рассчитываются по формулам (1) – (4)[15][16]:

$$v_{LF} = \frac{1}{R_{wheel}} \cdot \left(v_x - v_y - \left(\frac{s_{RL}}{2} + \frac{s_{FR}}{2}\right) \cdot v_z\right) \quad (1)$$

$$v_{RF} = \frac{1}{R_{wheel}} \cdot \left(v_x + v_y + \left(\frac{s_{RL}}{2} + \frac{s_{FR}}{2}\right) \cdot v_z\right) \quad (2)$$

$$v_{LR} = \frac{1}{R_{wheel}} \cdot \left(v_x + v_y - \left(\frac{s_{RL}}{2} + \frac{s_{FR}}{2}\right) \cdot v_z\right) \quad (3)$$

$$\upsilon_{RR} = \frac{1}{R_{wheel}} \cdot \left(\upsilon_x - \upsilon_y + \left(\frac{s_{RL}}{2} + \frac{s_{FR}}{2}\right) \cdot \upsilon_z\right) \quad (4)$$

где υ_{LF}, υ_{RF}, υ_{LR}, υ_{RR} – целевые скорости вращения левого переднего, правого переднего, левого заднего и правого заднего колес соответственно в рад/с; R_{wheel} – радиус колеса; υ_x – целевая линейная скорость по оси X в м/с; υ_y – целевая линейная скорость по оси Y в м/с; υ_z – целевая угловая скорость по оси Z в рад/с; s_{RL} – расстояние между правым и левым колесами; s_{FR} – расстояние между передним и задним колесами. Затем целевые скорости колес отправляется через *hardware interface* на каждое колесо.

Также контроллер рассчитывает позицию робота и публикует одометрию в ROS-топик */odom*. Контроллер получает текущую скорость вращения колеса и на основе этих данных рассчитывает положение робота по формулам (5) – (7)[17]:

$$\upsilon_{xc} = (\upsilon_{LFC} + \upsilon_{RFC} + \upsilon_{LRC} + \upsilon_{RRC}) \cdot \frac{R_{wheel}}{4} \quad (5)$$

$$\upsilon_{yc} = (-\upsilon_{LFC} + \upsilon_{RFC} + \upsilon_{LRC} - \upsilon_{RRC}) \cdot \frac{R_{wheel}}{4} \quad (6)$$

$$\upsilon_{zc} = (-\upsilon_{LFC} + \upsilon_{RFC} - \upsilon_{LRC} + \upsilon_{RRC}) \cdot \frac{R_{wheel}}{2(s_{RL}+s_{FR})} \quad (7)$$

где υ_{xc} — текущая линейная скорость по оси X в м/с; υ_{yc} — текущая линейная скорость по оси Y в м/с; υ_{zc} — текущая угловая скорость по оси Z в рад/с; υ_{LFC}, υ_{RFC}, υ_{LRC}, υ_{RRC} — текущие скорости вращения левого переднего, правого переднего, левого заднего и правого заднего колес соответственно; R_{wheel} — радиус колеса; s_{RL} — расстояние между правым и левым колесами; s_{FR} — расстояние между передним и задним колесами. Схема получаемых и отправляемых контроллером сообщений представлена на рисунке 5.

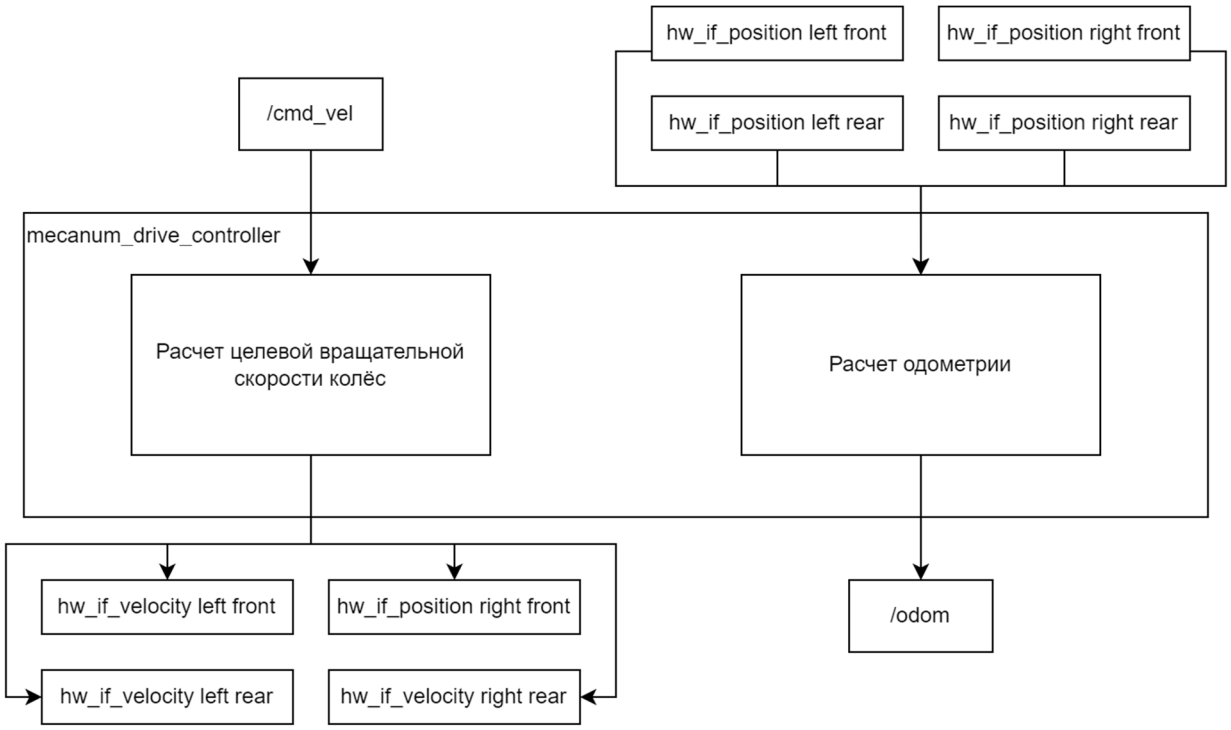


Рисунок 5 — Схема обмена сообщениями

Для правильного функционирования контроллеру необходимо задать топик команд и одометрии, фрейм одометрии, базовый фрейм робота, частоту обновления данных, и указать названия сочленений колес, радиус колеса, расстояние между передними и задними, правыми и левыми колесами.

Заключение

В статье представлена разработка виртуальной модели мобильного робота «ЛИРС-ArtBul-2», использующего четыре колеса Илона. Важным критерием качества симуляции является производительность. Поэтому для визуальной части ролика колеса была разработана высокополигональная и детализированная модель, а для коллизионной части – низкополигональная. Это позволило значительно увеличить RTF симуляции. Для управления виртуальным роботом был разработан и успешно протестирован контроллер, который подходит для всех мобильных роботов с колесами Илона.

Литература

1. Rubio F., Valero F., Llopis-Albert C. A review of mobile robots: Concepts, methods, theoretical framework, and applications //International Journal of Advanced Robotic Systems. – 2019. – Т. 16. – №. 2. – С. 1729881419839596.
2. Watanabe K. et al. Autonomous Control for An Omnidirectional Mobile Robot with Feedback Control System //Advances in Intelligent Autonomous Systems. – 1999. – С. 289-308.
3. Qian J. et al. The design and development of an omni-directional mobile robot oriented to an intelligent manufacturing system //Sensors. – 2017. – Т. 17. – №. 9. – С. 2073.
4. Paromtchik I. E., Rembold U. A practical approach to motion generation and control for an omnidirectional mobile robot //Proceedings of the 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation. – IEEE, 1994. – С. 2790-2795.
5. Magid E. et al. Automating pandemic mitigation //Advanced Robotics. – 2021. – Т. 35. – №. 9. – С. 572-589.
6. Senft E., Satake S., Kanda T. Would you mind me if i pass by you? socially-appropriate behaviour for an omni-based social robot in narrow environment //Proceedings of the 2020 ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction. – 2020. – С. 539-547.
7. Wu X. B. et al. Research on the design of educational robot with four-wheel omni-direction chassis //J. Comput. – 2018. – Т. 29. – №. 4. – С. 284-294.
8. Watanabe K. Control of an omnidirectional mobile robot //1998 Second International Conference. Knowledge-Based Intelligent Electronic Systems. – IEEE, 1998. – Т. 1. – С. 51-60.
9. Gfrerrer A. Geometry and kinematics of the Mecanum wheel //Comp. Aided Geom. Design. – 2008. – Т. 25. – №. 9. – С. 784-791.
10. Shabalina K., Sagitov A., Magid E. Comparative analysis of mobile robot wheels design //2018 11th International Conference on Developments in esystems Engineering. – IEEE, 2018. – С. 175-179.
11. Chikurtev D. Mobile robot simulation and navigation in ROS and Gazebo // International Conference Automatics and Informatics. – IEEE, 2020. – С. 1-6.
12. Zailan N. Z. et al. Obstacle Avoidance of a 3WD Omni-Wheel Mobile Robot in Webots Environment // International Conference on System Engineering and Technology. – IEEE, 2021. – С. 143-146.
13. Zamfirescu I., Pascal C. Modelling and simulation of an omnidirectional mobile platform with robotic arm in CoppeliaSim //International Conference on System Theory, Control and Computing. – IEEE, 2020. – С. 667-672.
14. Apurin A. et al. LIRS-ArtBul: design, modelling and construction of an omnidirectional chassis for a modular multipurpose robotic platform //International Conference on Interactive Collaborative Robotics. – Cham : Springer International Publishing, 2022. – С. 70-80.
15. Taheri H., Qiao B., Ghaeminezhad N. Kinematic model of a four mecanum wheeled mobile robot //International journal of computer applications. – 2015. – Т. 113. – №. 3. – С. 6-9.
16. Dickerson S. L., Lapin B. D. Control of an omni-directional robotic vehicle with Mecanum wheels //NTC'91-National Telesystems Conference Proceedings. – IEEE, 1991. – С. 323-328.
17. Maulana E., Muslim M. A., Hendrayawan V. Inverse kinematic implementation of four-wheels mecanum drive mobile robot using stepper motors //2015 international seminar on intelligent technology and its applications (ISITIA). – IEEE, 2015. – С. 51-56.

Информация об авторах

Апурин Артём Александрович, аспирант, Казанский федеральный университет (КФУ), Россия, 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, д. 18, aaa@it.kfu.ru, ORCID: 0000-0001-8362-6276

Магид Евгений Аркадьевич, доцент ВАК, Ph.D., профессор, КФУ, Россия, 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, д. 18, magid@it.kfu.ru, ORCID: 0000-0001-7316-5664

Особенности радиолинии управления роботом-водителем на автомобиле-мишени

А.Ю. Гетманцев✉, С.С. Мырзажанов, Т.В. Меньшакова
Государственный летно-испытательный центр им. В.П. Чкалова (ГЛИЦ им. В.П. Чкалова) Минобороны России г. Ахтубинск, Астраханская область, Россия, tomamens@mail.ru

Аннотация
В статье приведены результаты синтеза состава радиотехнической системы, обеспечивающей радиоуправление беспилотного наземного транспортного средства при роботизации серийных автомобилей, используемых в целях обеспечения испытаний на авиационных полигонах. Особое внимание уделено повышению помехоустойчивости радиосистемы, определены особенности основных требований, предъявляемых к ней по типовым аспектам. Определен объем минимально необходимого информационного потока, структурные схемы управления и радиоканала передачи команд.

Ключевые слова
Радиосистема управления, роботизированный автомобиль, авиационная мишень, помехоустойчивость.

Features of the radio control line of a robot driver on a target car

Alexey Yu. Getmantsev✉, Samat S. Myrzazhanov, Tamara V. Menshakova
V.P. Chkalov State Flight Test Center (V.P.Chkalov GLITZ)of the Russian Ministry of Defense, Akhtubinsk, Astrakhan region, Russia, tomamens@mail.ru

Annotation
The article presents the results of the synthesis of the composition of a radio engineering system that provides radio control of an unmanned ground vehicle during the robotization of production vehicles in order to ensure testing at aviation ranges. Special attention is paid to improving the noise immunity of the radio system, the features of the basic requirements for it in terms of typical aspects are determined. The volume of the minimum required information flow, control block diagrams and radio command transmission channels have been determined.

Key words
Radio control system, robotic vehicle, aviation target, noise immunity.

Современный этап развития радиотехники связан с широким внедрением дистанционно-управляемых роботизированных процессов в различных сферах деятельности человека.

В настоящей статье рассмотрены особенности применения радиосистемы для дистанционного управления роботом (рис.1), который управляет серийным автомобилем (рис. 2).

Рисунок 1 — Дистанционно-управляемый робот-водитель

Рисунок 2 — Роботизированный серийный автомобиль

После роботизации данный автомобиль целесообразно применять в опасных условиях, например, на военных полигонах в качестве дистанционно управляемого тягача или авиационной мишени. Оператор управляет роботом-водителем непрерывно (рис. 3) или программно при помощи специально разработанного программного обеспечения.

Рисунок 3 — Рабочее место оператора, дистанционно управляющего роботом

Такое решение экономически выгодно, т.к. стоимость существующих наземных мишеней во много десятков раз превосходит стоимость серийного автомобиля (бывшего в употреблении) с установленной роботизированной системой управления.

В конструкцию автомобиля принципиальные изменения не вносятся. Однако при необходимости дополнительно устанавливаются серийно выпускаемые системы:

- видеокамеры системы регистрации;
- видеосистема для дистанционного контроля и визуализации управления;
- радиотелеметрическая система передачи данных и т.д.

Повышая степень автоматизации и роботизации, можно сократить сроки подготовки и повысить качество и безопасность обучения летного состава.

Известен зарубежный аналог дистанционно управляемого робота-водителя – комплект аппаратуры фирмы «Kairos Autonomi» (США) для роботизации серийного автомобиля.

Современные цифровые технологии позволяют решать новые задачи на стыке двух технических областей – робототехники и радиоуправления.

Все чаще используются автоматизированные производственные линии, которые исключают человека на опасных участках, заменяя выполняемые им операции на дистанционно-управляемые или совсем полностью автоматические. Активно внедряются роботизированные станки и роботы-манипуляторы. В данной статье рассматривается робот с манипуляторами (электромеханическими приводами), который управляет автомобилем. Основные операции робота-водителя приведены в таблице 1.

Таблица 1 — Основные операции робота-водителя

Операция	Исполнительное устройство	Минимальное значение	Обычное значение	Максимальное значение
Поворот по кругу по часовой или против часовой стрелки	Руль	-540° (полтора оборота влево)	0° (посредине)	540° (полтора оборота вправо)
Нажатие вперед/отпускание	Педаль газа	0 мм	0 мм	100 мм
Нажатие вперед/отпускание	Педаль тормоза	0 мм	0 мм	100 мм
Смещение вперед-назад	Рычаг автоматической коробки переключения передач (АКПП)	-50 мм (движение назад)	0 мм (стоянка на месте)	50 мм (движение вперед)

Для выполнения четырех перечисленных операций должен применяться робот-водитель не менее чем с четырьмя независимыми манипуляторами.

Основные технические и экономические требования к роботу-водителю:

- модульная и простая конструкция (легкосъемные составные части и механизмы);
- низкобюджетные (достаточно дешевые) комплектующие;
- минимальное количество комплектующих;
- маневренность при управлении;
- высокая скорость отработки команд (резкий старт, быстрое торможение и т.д.);
- надежность работы при движении по пересеченной местности;
- малая масса робота-водителя и его аппаратуры;
- компактность в сложенном виде и высокая транспортабельность.

К аппаратуре оператора предъявляются аналогичные требования, а также возможность подключения типовых выпускаемых серийно исполнительных (игровых) устройств (руль, педали и т.д.). Требования к программному обеспечению не рассматриваются.

Благодаря использованию разрабатываемой роботизированной системы на полигоне значительно снижается риск подвергнуть опасности здоровье и жизнь человека, поскольку он управляет автомобилем-мишенью дистанционно, находясь в безопасном месте.

При модульном исполнении легко выполняется ремонт поврежденного робота-водителя, перенастройка и модернизация его оборудования.

Безусловно, для полноценного получения информации о текущем состоянии роботизированного автомобиля, препятствиях перед ним и т.п. требуются дополнительные устройства:

- спутниковая навигационная система;
- аппаратура экстренной аварийной дистанционной остановки автомобиля (по отдельному радиоканалу);
- видеокамеры переднего и кругового обзора;
- радиотелеметрическая система передачи текущих параметров (остатка топлива, курса движения, угла поворота передних колес, крена кузова автомобиля, текущей курсовой скорости, заряд аккумулятора и т.д.) на пункт управления.

Перечисленные вспомогательные системы подробно не рассматриваются, поскольку для них применяются отдельные радиоканалы обмена информацией и управления, а их разработка является самостоятельной задачей. В рассматриваемой радиосистеме управления роботизированным автомобилем-мишенью используется однонаправленный симплексный радиоканал [6].

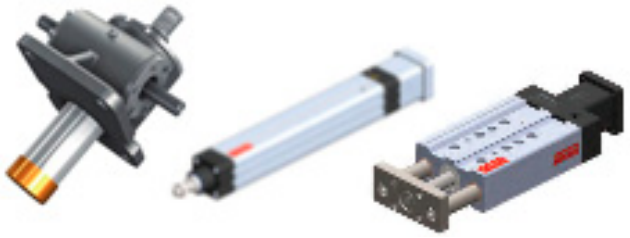
Минимально возможный объем операций, перечисленный в табл.1, определяет общее количество управляемых параметров:

- два параметра, которые меняются в положительную и отрицательную сторону (поворот руля, направление движения);
- два параметра, которые меняются от нуля в положительную сторону (газ и тормоз).

Таким образом, общее количество параметров управления равно 4.

Непосредственно операцию поворота руля реализует редуктор с шаговым двигателем - сервоприводом, а остальные операции – линейно-осевые сервоприводы-актуаторы (рис.4). Редуктор в составе сервопривода позволяет увеличить допустимую нагрузку и повышает точность его перемещения. Основная функция сервоприводов – это поворот вала сервопривода на определенный дискретный угол в зависимости от количества пришедших импульсов:

- положительной полярности – поворот против часовой стрелки;
- отрицательной полярности – поворот по часовой стрелке.



а) **б)**

Рисунок 4 — Сервоприводы: а) с поворотным редуктором; б) линейно-осевые актуаторы

Для точного управления шаговыми сервоприводами используются драйверы (рис.5), энкодеры (датчики фактического угла поворота вала шагового двигателя) и линейные датчики (контроль работы линейно-осевого актуатора). Драйверы формируют последовательность импульсов, например, в зависимости от поступившей команды с контроллера управления и фактического угла поворота, подтвержденного энкодером.

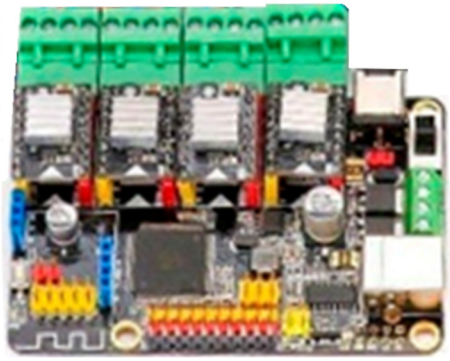


Рисунок 5 — Внешний вид 4-х канального драйвера

На рисунке 6 приведена общая структурная схема радиосистемы управления роботом-водителем.

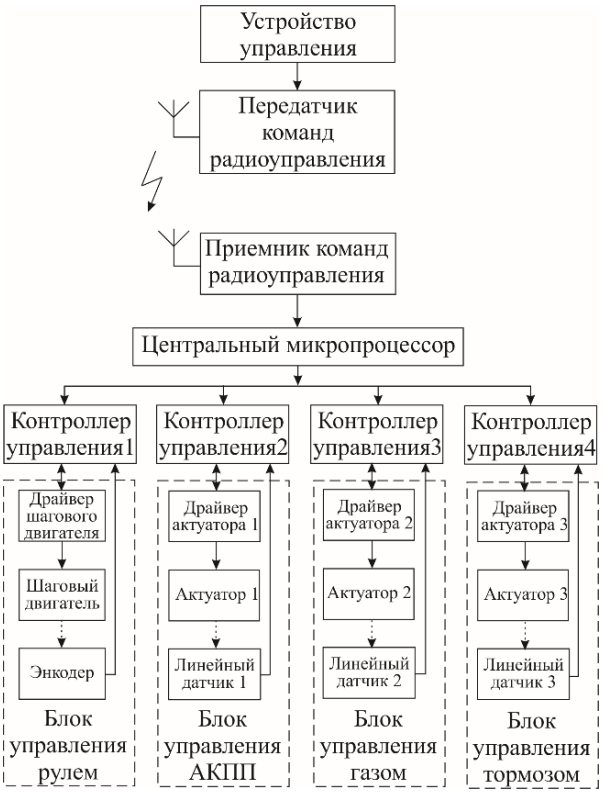


Рисунок 6 — Общая структурная схема управления роботом-водителем

Помимо радиоканала, для дистанционного управления роботом-водителем теоретически могут использоваться другие типы каналов управления:

– оптические (управление по лазерному лучу);
– проводные;
– инфракрасные.

Однако эти типы каналов непрактичны. Так, оптические системы, передающие данные при помощи модулированного лазерного луча, очень чувствительны к пыли, туману, предметам на визуальной линии распространения лазерного луча. Аналогично, инфракрасный луч очень быстро поглощается в непрозрачной атмосфере. Проводной канал управления роботизированным автомобилем-мишенью резко ограничивает радиус применения всего несколькими десятками метров, т.е. длиной проводов управления.

Радиоуправление, в отличие от других перечисленных способов, не имеет таких ограничений: легко может работать в тумане, в дыму или в пыли, на требуемом расстоянии не менее 30 км, обеспечивая устойчивую радиосвязь и управление.

Безусловно, у радиолиний командного управления есть свои недостатки [7]. Самый главный из них - восприимчивость к радиопомехам. Для борьбы с ними используют:

– специальные помехоустойчивые способы кодирования передаваемой цифровой информации;
– специальные виды модуляции, обладающие лучшими показателями помехозащищенности;
– широкополосные сигналы со специально рассчитанной корреляционной функцией.

Для повышения помехоустойчивости разрабатываемой радиосистемы предлагается использовать широкополосное кодирование методом прямого расширения кода [3].

Достоинства помехоустойчивых методов кодирования:

1. значительно уменьшается уровень ошибок в принятом информационном потоке;
2. повышается энергетическая скрытность, помехозащищенность, имитационная скрытность проектируемой радиосистемы управления.

Недостатки помехоустойчивых методов кодирования:

1. значительно усложняется радиосистема;
2. повышается стоимость конструкции в целом;
3. большее количество радиоэлементов неизбежно приводит к некоторому снижению надежности радиосистемы;
4. дополнительные каскады помехоустойчивого кодирования и декодирования требуют некоторого времени на обработку информации.

Однако, несмотря на все перечисленные недостатки, современные условия эксплуатации радиосистем требуют применения специальных методов помехоустойчивого кодирования.

В настоящей статье рассмотрен метод прямого расширения полосы частот сигнала при помощи M- последовательности и сипользовании относительной фазовой манипуляции [4-7].

Среди широкополосных сигналов особое значение занимают кодовые последовательности, которые являются последовательностями максимальной длины или M- последовательностями [1].

M- последовательности принадлежат к разряду двоичных линейных рекуррентных последовательностей и представляют собой набор N −периодически повторяющихся двоичных символов. Причем каждый текущий символ d_j образуется в результате сложения по модулю 2 некоторого числа m предыдущих символов, одни из которых умножаются на 1, а другие – на 0. В m-разрядном регистре максимальный период равен: $N^m - 1$. Величина m называется памятью последовательности.

Наибольший значение имеет нормированная автокорреляционная функция M- последовательности [3]. Различают два случая получения такой автокорреляционной функции (далее - АКФ): в периодическом (ПАКФ) и апериодическом (ААКФ) режимах. ПАКФ имеет основной пик, амплитуда которого равна единице, и ряд боковых выбросов, амплитуды которых примерно равны $1/N$. С ростом N ПАКФ приближается к идеальной, когда боковые пики становятся по сравнению с основным пренебрежимо малы. Боковые пики ААКФ существенно больше боковых пиков ПАКФ.

В настоящей статье рассматривается 127-элементная M- последовательность, для создания которой используется регистр из 7 триггеров. Ее период равен:

$$N = 2^7 - 1 = 127 \text{ (тактовых импульсов)}.$$

Таким образом, для повышения достоверности и помехозащищенности передачи информации, а также скрытности работы радиосистемы применяется прямое расширение полосы частот передаваемого радиосигнала последовательностью широкополосного псевдошумового сигнала (далее - ПШС) с базой 127, в качестве которого использована M- последовательность.

Применение в радиосвязи цифровых технологий обладает преимуществами:

– значительное удешевление элементной базы;
– снижение требований к соблюдению точностных характеристик параметров радиоэлементов;
– повышение быстродействия радиосистемы в целом;
– уменьшение во много раз вероятности ошибки на один переданный информационный символ;
– снижение чувствительности радиоэлементов к перепадам температуры, давления и т.п.;
– обеспечение возможности высокоскоростного помехоустойчивого кодирования/декодирования.

Формируемый и передаваемый затем в эфир сигнал будет проходить следующие преобразования [2]:
- аналогово-цифровое преобразование аналогового сигнала датчиков на пульте управления оператора;
- цифровое умножение информационного сигнала на псевдошумовой сигнал;
- преобразование сигнала по закону относительной фазовой манипуляции (ОФМ);
- манипуляция полученным сигналом высокочастотного несущего сигнала.

Одновременная и независимая работа оператора, дистанционно управляющего роботом-водителем при помощи 4 органов управления (таблица 1), требует выбора вида разделения 4 информационных каналов.

Возможные варианты: частотное разделение, временное разделение, кодовое разделение.

Частотное разделение каналов требует наличия 4 независимых поднесущих частот для передачи всех параметров, т.е. не менее 4 колебательных контуров, 4 смесителей и т.д.

При временном разделении каждому из каналов выделяется короткий интервал времени в общем цикле информации, при этом аппаратная реализация будет самой простой и дешёвой.

При кодовом разделении каналов каждому источнику сигнала приписывается своя кодовая комбинация с адресом источника и адресом получателя информации, при этом одновременная передача данных требует их последовательного распределения во времени. За счет адресации – это более сложный вариант, чем временное разделение каналов.

Таким образом, в разрабатываемой радиосистеме будет использовано временное разделение четырех информационных каналов.

Количество разрядов квантователя АЦП каждого из 4 источников информации определяется следующим образом.

Для управления рулем в диапазоне от -540° до +540° с точностью 6° требуется не менее:

$$N_{\text{разрруль}} = log_2\left(\frac{540-(-540)}{6}+1\right) = 7{,}525 \approx 8 \text{ разрядов.}$$

Для управления педалью газа (педалью тормоза - аналогично) в диапазоне от 0 до 100 мм с точностью 5 мм требуется не менее:

$$N_{\text{разрпедаль}} = log_2\left(\frac{100-0}{5}+1\right) = 4{,}41 \approx 5 \text{ разрядов.}$$

Для управления рычагом АКПП в диапазоне от -50 до 50 мм с точностью 50 мм требуется не менее:

$$N_{\text{разрАКПП}} = log_2\left(\frac{50-(-50)}{50}+1\right) = 1{,}66 \approx 2 \text{ разряда.}$$

В случае применения однотипных АЦП для каждого канала необходимо использовать 4 одинаковых восьмиразрядных АЦП, что значительно упрощает их синхронизацию и объединение информации в общий поток. За один такт опроса всех четырех информационных датчиков формируется слово длиной $8 \cdot 4 = 32$ бита при частоте опроса датчиков $F_{\text{опроса}} = 5$ Гц, т.е. каждому датчику – источнику сигнала с пульта дистанционного управления роботом-водителем (руль, две педали и рычаг АКПП) выделяется свой отдельный временной интервал в 0,2 с.

В случае, если информационный символ равен «1», он заменяется основной M- последовательностью из 127 импульсов. Если же информационный символ равен «0», тогда он заменяется инвертированной M- последовательностью из 127 импульсов, когда каждый единичный импульс заменяется нулевым и наоборот.

В когерентном корреляторе приемника приход импульсов положительной основной M −последовательности выдает пик АКФ положительной полярности, в 127 раз превышающий уровень боковых лепестков. Прием импульсов инвертированной M- последовательности формирует в когерентном корреляторе приемника такой же пик, но уже отрицательной полярности. Тем самым резко увеличивается отношение «сигнал/шум» на выходе приемника, улучшая во много раз помехоустойчивость радиоканала.

В начале каждого информационного пакета с ПШС-кодированием необходимо добавлять биты синхросигнала начала сообщения. Для устойчивой обработки в приемнике высокочастотного фазоманипулированного сигнала указанного количества колебаний вполне достаточно. В случае импульса на выходе кодера ПШС, равного «0», в фазовом модуляторе передатчика происходит скачок фазы высокочастотного колебания на 180°, если импульс равен «1» - фаза не меняется. Такой закон изменения фазы представляет собой ОФМ-кодирование. Наименьшей вероятностью ошибки обладает фазовая манипуляция, при которой информационному сигналу «0» соответствует фаза колебания несущей частоты 180 градусов, а «1» - фаза 0 градусов. Самым главным недостатком фазовой манипуляции является эффект «обратной работы», при котором возможно ошибочное определение фазы сигнала в приемнике из-за неизвестного момента времени включения приемника. Для исключения этого модулирующая информация закладывается не в абсолютном значении фазы несущей частоты, а в относительном изменении этой фазы по сравнению с фазой высокочастотного сигнала на предыдущем информационном такте – получается относительная фазовая манипуляция (рис. 7). Нулю соответствует скачкообразное изменение фазы на 180 градусов, при поступлении символа «1» фаза колебания не меняется.

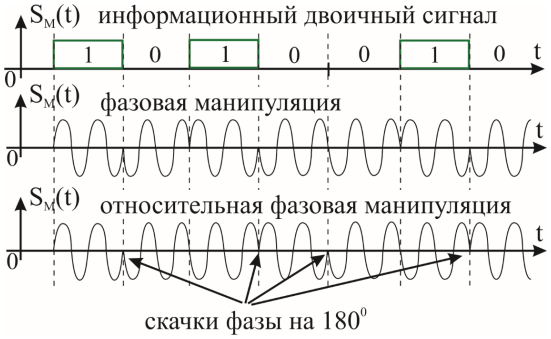


Рисунок 7 — Формирование радиосигнала с относительной фазовой манипуляцией

Прием радиосигналов с ОФМ бывает когерентным и некогерентным. При некогерентном приеме выделяется огибающая сигнала, и ошибка может возникнуть только в одном символе в момент перескока фазы опорного сигнала, а следующие декодируются в приемнике без ошибок. Опорным значением фазы для текущего принимаемого символа является фаза предшествующего символа в момент прихода тактового импульса.

В случае когерентного приема должна быть обеспечена синхронизация опорного генератора и принимаемого сообщения с точностью до фазы. Для определения начальной фазы первого бита информации перед ним дополнительно вставляется один вспомогательный бит. К достоинствам когерентного приема сигналов с ОФМ следует отнести то, что оптимальная фильтрация (получение максимального побитного отношения «сигнал/шум») осуществляется в приемнике до линии задержки. При вероятности ошибки 10^{-6} когерентный прием сигналов с двоичной ОФМ требует на 3-5 дБ (в 2–3 раза) меньшего отношения «сигнал/шум» h_0^2, чем в случае некогерентного.

Таким образом, радиосистема должна функционировать в лучшем режиме – режиме когерентной обработки принятых радиосигналов.

Поскольку информация заложена в изменении фазы несущего колебания в начале каждого такта, то в начале каждого сеанса радиосвязи в информационный поток дополнительно вставляется один тактовый интервал.

Если при относительной фазовой манипуляции и когерентном приеме вероятности ошибки $P = 10^{-6}$, то минимальное отношение «сигнал/шум» ориентировочно равно 25 дБ или 316 раз [4]. Тогда минимальная мощность сигнала на выходе передатчика будет равна:

$$\mathrm{P_{ПРДмин}} = \frac{h_0^2 \cdot (4\pi r)^{2} \cdot L \cdot N_0 \cdot \Delta F_{\text{ш}}}{G_{\text{ПРД}} \cdot G_{\text{ПРМ}} \cdot \lambda^2} = 1{,}12 \text{ Вт.}$$

Рассчитанное значение минимальной мощности передатчика является достаточно малым (около 1 Вт). Это связано с малым отношением «сигнал/шум» ($h_0^2 = 25$ дБ), небольшим расстоянием ($r = 30$ км) и длиной волны передатчика в 0,545 м. Для повышения качества радиоуправления в условиях естественных и специально организованных помех необходимо увеличить мощность передатчика до $\mathrm{P_{ПРД}}$=2 Вт.

С учетом длительности одного элементарного импульса отношение «сигнал /шум» в этом случае равно:

$$h_0^2 = 4022{,}3\text{раз} \approx 36\text{дБ}.$$

Рассчитанное отношение «сигнал /шум» является достаточно большим. Это говорит о возможности во много раз увеличить объем передаваемой информации при обеспечении высокого качества радиоуправления. Однако рассчитанного ранее объема передаваемой информации достаточно для выполнения основных функций роботом-водителем.

Теперь требуется проверить обеспечение дальности прямой видимости из-за кривизны Земли с учетом и без учета рефракции радиоволн. Дальность прямой видимости (в км) без учета рефракции (огибания) рассчитывается по формуле:

$$D = 3{,}57 \cdot \left(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}\right) = 3{,}57 \cdot \left(\sqrt{20} + \sqrt{2}\right) = 21{,}0\text{км}.$$

где h_1, h_2 – типовая высота (в метрах) мачты передающей антенны (20 м) и приемной антенны автомобиля-мишени соответственно (2 м).

Проверяется условие обеспечения дальности прямой видимости с учетом рефракции радиоволн (т.е. незначительного огибания радиоволнами Земной поверхности). В этом случае формула дальности прямой видимости (в км) имеет вид:

$$D = 4{,}12 \cdot \left(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}\right) = 4{,}12 \cdot \left(\sqrt{20} + \sqrt{2}\right) = 24{,}25 \text{ км}.$$

Для обеспечения дальности прямой видимости в 30 км с учетом рефракции радиоволн необходимо незначительно увеличить высоту антенн: передающей антенны до 30 м, а приемной антенны до 3,3 м. В этом случае дальность прямой видимости будет равна:

$$D = 4{,}12 \cdot \left(\sqrt{30} + \sqrt{3{,}3}\right) = 30{,}05 \text{ км}.$$

Возможна ситуация, когда в пределах зоны уверенного приема при высокой мощности сигнала в конкретной точке пространства этот же сигнал на входе приемника будет иметь околонулевой уровень. Это эффект замираний принимаемого сигнала вызван многолучевым распространением радиоволн, когда несколько переотраженных радиолучей приходят в одну точку в противофазе и гасят друг друга. Для борьбы с многолучевостью применяются пространственное, частотное и временное разнесение принимаемого сигнала [3].

Частотное разнесение – это когда сигнал передается одновременно на нескольких несущих частотах. Точки противофазного совпадения радиолучей на различных частотах не совпадают, однако это требует дублирования передающих и приемных частей на каждой несущей частоте.

При временном разнесении один и тот же радиосигнал передается несколько раз подряд, что недопустимо в радиосистемах управления.

Возможна реализация способа пространственного разнесения двух приемных антенн на автомобиле-мишени, при этом расстояние между ними должно быть порядка

$$d = 10\lambda = 10 \cdot 0{,}545 = 5{,}45 \text{ м}.$$

Такое расстояние легко обеспечить, расположив приемные антенны в диаметрально противоположных углах автомобиля-мишени.

Таким образом, для борьбы с многолучевостью был выбран пространственный метод разнесения приемных антенн на автомобиле-мишени.

Рассматриваемая радиосистема с дистанционным управлением автомобилем-мишенью при помощи робота-водителя относится к классу командных радиосистем цифровой передачи информации.

Анализ существующих типов радиосистем показал, что лучшим решением построения является следующая структурная схема радиосистемы передачи команд управления (рис. 8):

а) передающая часть:
- пульт управления роботом-водителем – источник аналоговых сигналов по четырем параметрам;
- АЦП по четырем каналам с канальными ключами (КК);
- формирователь служебной информации (ФСИ), содержащей кадровые синхроимпульсы;
- устройство объединения информации (УОИ), в котором соединяется информационный сигнал со служебным;
- генератор тактовых импульсов (ГТИ);
- умножитель частоты на 127 для синхронизации ПШС-кодера и ПШС-генератора;
- ПШС-генератор;
- ПШС-кодер;
- ОФМ-кодер;
- высокочастотная часть передатчика (далее - ВЧ ПРД);
- антенна;

б) приемная часть:
- антенна;
- высокочастотная часть приемника (ВЧ ПРМ);
- ОФМ-декодер;
- выделитель тактовых импульсов (ВТИ);
- делитель частоты на 127 для синхронизации кодера ПШС и последующих низкочастотных трактов;
- ПШС-генератор;
- ПШС-декодер;
- устройство разделения информации (УРИ);
- выделитель служебной информации (ВСИ).

Оконечным потребителем принятой информации выступает центральный контроллер робота-водителя автомобиля-мишени.

Как передающая часть, так и приемная часть рассматриваемой радиосистемы запитываются от собственных встроенных источников питания.

Передатчик состоит из высокочастотной части и низкочастотной части (остальные блоки из состава передающей части, размещенные на пульте управления роботом-водителем).

Основные требования, предъявляемые к блокам передатчика и приемника:
- модульность, простота конструкции, дешевизна и минимальная номенклатура комплектующих;
- малая масса, высокая транспортабельность (работа на пересеченной местности), герметичность и компактность;
- простота и надежность подключения антенн передатчика и приемника.

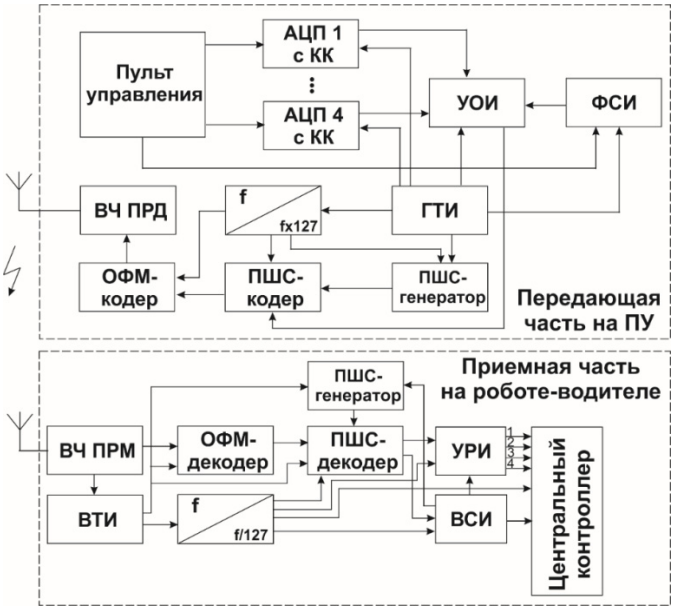


Рисунок 8 — Структурная схема радиосистемы управления роботом-водителем

Конструкции приемника и передатчика должны выдерживать все условия эксплуатации автомобиля-мишени (в случае, если оператор доставляет его на полигон «своим ходом»):

- уровни вибрации и перегрузки, соответствующие грунтовым дорогам;
- возможность однократных ударов в случае падения блока на бетонную дорогу;
- перепады давления, температуры и влажности в случае эксплуатации соответственно в горах, в пустынных условиях, зимой или летом, под дождем, в условиях пыли и песка.

В качестве блока питания применяется серийный блок с выходными напряжениями «+12В», «+5В», «-5 В».

Таким образом, в статье была рассмотрена радиосистема управления роботом-водителем автомобиля-мишени, имеющая важные отличительные особенности:

- применение метода прямой замены информационного кода помехоустойчивой M- последовательностью;
- применение временного разделения каналов управления;
- использование пространственного разнесения приемных антенн для исключения замираний;
- используется относительная фазовая манипуляция передаваемого радиосигнала.

Литература

1. Кассами Т.И. и др. Теория кодирования. – М.: Мир, 1976.
2. Коптев Г.И, Панина Т.А. Расчет и конструирование транзисторных передатчиков. - М.: Изд. МЭИ, 1977 г.
3. Мазурков М.И. Системы широкополосной радиосвязи: учебн. Пособие для студ. вузов – Одесса.: Наука и техника, 2009. – 344 с.
4. Проектирование радиоприемных устройств. Под ред. А.П.Сиверса. Учебное пособие для вузов. М., «Советское радио». 1976.
5. Садомовский А.С. Радиосистемы передачи информации: Учебное пособие. Ульяновск, УлГТУ, 2001, 104 с.
6. Тепляков И.М. Основы построения телекоммуникационных систем и сетей: Учеб, пособие. ISBN 5-256-01720-9. - М.: Радио и связь, 2004. – 328 с.: ил.
7. Тепляков И.М., Рощин Б.В., Фомин А.И. Радиосистемы передачи информации. - М: Радио и связь, 1982.

Информация об авторах

Гетманцев Алексей Юрьевич, к.т.н., доцент, Государственный летно-испытательный центр им. В.П. Чкалова, Минобороны России (ГЛИЦ им. В.П. Чкалова), Россия, 416507, г. Ахтубинск, Астраханская обл., tomamens@mail.ru

Мырзажанов Самат Сагынгалиевич, ГЛИЦ им. В.П. Чкалова, Россия, 416507, г. Ахтубинск, Астраханская обл.

Меньшакова Тамара Викторовна, ГЛИЦ им. В.П. Чкалова, Россия, 416507, г. Ахтубинск, Астраханская обл., tomamens@mail.ru

Построение карты глубины сцены на основе данных стереопары

А.А. Жиленков, О.С. Крупинин✉, Д.М. Пимонов
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет (СПбГМТУ), Санкт-Петербург, Россия, Krupinin.OS.SMTU@ya.ru

Аннотация
Данная статья посвящена разрабатываемому программному комплексу для интерпретации потока стереопар. Рассмотрим используемую модель стереоскопической системы и теоретические основы вычисления карт глубины по снятым с нее изображениям. Опишем процесс вычисления карт глубины и его две подзадачи: вычисление параметров камер стереосистемы и поиск сопряженных точек на стереопаре. Продемонстрируем примеры работы программы. Рассмотрим дополнительные возможности разработки, текущие задачи и планы по ее дальнейшему развитию.

Ключевые слова
Реконструкция трехмерной сцены, стереоскопическая система, стереопара, стереозрение, карта диспаратности, карта глубины, компьютерное зрение, сегментация изображения.

Building a scene depth map based on stereo pair data

Anton A. Zhilenkov, Oleg S. Krupinin✉, Dmitry M. Pimonov
Saint-Petersburg State Marine Technical University (SPbSMTU), St. Petersburg, Russia, Krupinin.OS.SMTU@ya.ru

Abstract
This article is devoted to the software package for interpreting the stream of stereo pairs. We will consider the model of the stereoscopic system used and the theoretical foundations for calculating depth maps based on the images taken from it. We will describe the process of calculating depth maps and two subtasks: calculating the parameters of the stereo system cameras and searching for conjugate points on a stereo pair. We will demonstrate examples of the program's operation. We will consider additional development capabilities, current tasks and plans for its further development.

Key words
Reconstruction of the three-dimensional scene, stereoscopic system, stereo pair, stereovision, disparity map, depth map, computer vision, image segmentation.

Введение

Для ориентации беспилотной системы в пространстве необходимо в некотором представлении реконструировать ее окружение. В зависимости от задачи требуется сегментировать объекты, классифицировать, определять расстояние до них и характер их движения. Для получения данных для анализа могут использоваться различные датчики – тепловые, ультразвуковые, времяпролетные или оптические. У каждого типа датчика есть свои слабые и сильные стороны. Для ориентации в пространстве мы решили использовать стереоскопическую систему, состоящую из двух цифровых камер. По видеопотоку с камеры мы можем сегментировать объекты, классифицировать. Благодаря системе из двух камер с известным относительным позиционированием появляется возможность определять удаленность объектов. Зная расстояние до объектов на отдельных кадрах, можно анализировать и прогнозировать характер их движения. Мы разрабатываем программный комплекс для интерпретации потока стереопар, полученных с объективов стереосистемы. В данной статье кратко рассмотрим алгоритмы вычисления расстояний по стереопаре, возможности нашей разработки и дальнейшие планы по ее развитию.

Построение карты глубины сцены на основе данных стереопары

Стереоскопическая система состоит из двух проективных камер. Пара изображений сцены (I^l, I^r), полученных со стереосистемы, называется стереопарой. Каждое изображение трехканальное $I \in \mathbb{R}^{h \times w \times 3}$. Восстановить объемную сцену, значит вычислить трехмерную координату каждой точки сцены, отраженной на фотоприемнике одной из камер, в системе координат, привязанной к стереосистеме. Во многих приложениях можно ограничиться картой глубин $D \in \mathbb{R}^{h \times w}$ – матрица, содержащая расстояния между стереосистемой и объектами сцены. Таким образом необходимо реализовать алгоритм реконструкции Rec, выполняющий отображение (1).

$$D = R(I^l, I^r) \quad (1)$$

При восстановлении объемной сцены выполняются следующие подзадачи:
1. Определение параметров камер стереосистемы – задача калибровки камеры;
2. Вычисление карты диспаратности – задача поиска сопряженных точек на стереопаре;
3. Вычисление карты глубин.

Определение параметров камер стереосистемы

Кратко рассмотрим устройство стереоскопической системы и ее параметры. Стереоскопическая система состоит из двух проективных камер (рис. 1).

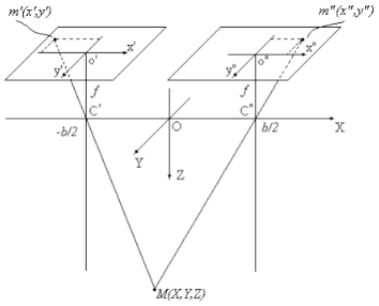


Рисунок 1 — Модель простой стереоскопической системы

Вариант с описанным расположением камер позволяет относительно просто определить координаты точек сцены, а также упрощает поиск сопряженных точек на стереопаре.

Используя простые геометрическое преобразование, можем получить три координаты точек сцены (2).

$$\begin{cases} X = \frac{b(x``+x`)}{2(x``-x`)} \\ Y = \frac{b(y``+y`)}{2(x``-x`)}, \\ Z = \frac{fb}{x``-x`} \end{cases} \quad (2)$$

где $(x`` - x`) = d$ – диспаратность.

Таким образом для определения глубины сцены нужно вычислить фокусное расстояние камер и значение диспаратности.

Модель проективной камеры изображена на рисунке 2.

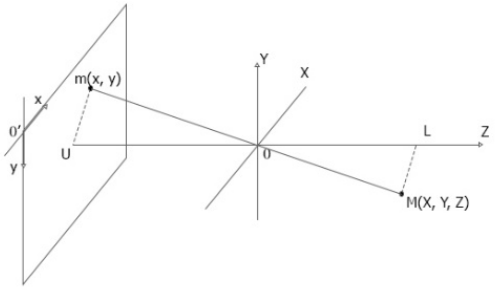


Рисунок 2 — Модель проективной камеры

Из геометрии модели легко получить систему для вычисления проекций трехмерных точек сцены матрицу камеры (3).

$$\begin{cases} x = \frac{fX}{wZ} + x_0 \\ y = \frac{fY}{hZ} + y_0 \end{cases} \quad (3)$$

Для упрощения вычислений будем рассматривать однородное проективное пространство. Пусть вектор M – радиус вектор точки сцены $(X, Y, Z, 1)^T$, а $v = (x, y, 1)^T$ – вектор проекционной точки в однородном пространстве в координатах изображения.

Тогда получим систему в матричном виде (4) [1, 2].

$$Zv = AM, \quad (4)$$

где A – матрица внутренних параметров камеры (5).

$$A = \begin{pmatrix} \frac{f}{w} & 0 & x_0 & 0 \\ 0 & \frac{f}{h} & y_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_x & 0 & x_0 & 0 \\ 0 & a_y & y_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (5)$$

В рассматриваемом случае координаты калибровочных точек известны в произвольной системе $\bar{O}\bar{X}\bar{Y}\bar{Z}$. Пусть в этой системе опорная метка определяется радиус вектором $\overline{M} = (\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z}, 1)^T$. Систему $\bar{O}\bar{X}\bar{Y}\bar{Z}$ можно привести к стандартной системе OXYZ с помощь матрицы поворота R, расширенной вектором переноса $(X', Y', Z', 1)^T$ (6) [1, 3].

$$M = R\overline{M} \quad (6)$$

А матрица C – калибровочная матрица камеры (7). Откалибровать камеру – значит найти элементы матрицы C, то есть определить внутренние и внешние параметры системы.

$$\mathrm{C} = AR \quad (7)$$

Ортогональность матрицы поворота и наша модель накладывает некоторые ограничения на калибровочную матрицу. Для ее вычисления используется метод наименьших квадратов. Для минимизации полученного функционала с условиями используется метод множителей Лагранжа и BFGS-оптимизация [3-7].

Дополнительно необходимо учитывать коэффициенты дисторсии, которые используются для устранения радиальных (8) и тангенциальных (9) искажений на изображениях входящей стереопары.

$$\begin{cases} \tilde{x} = x(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4) \\ \tilde{y} = y(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4) \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} \tilde{x} = x + (2p_1 xy + p_2(r^2 + 2x^2)) \\ \tilde{y} = y + (2p_2 xy + p_1(r^2 + 2y^2)) \end{cases} \quad (8)$$

где r – расстояние до центра изображения, k_1, k_2 – параметры радиальной дисторсии, p_1, p_2 – параметры тангенциальной дисторсии.

Построение карты диспаратности

Если известны параметры камер и вычислена карта диспаратности с помощью простых линейных равенств легко вычислить карту глубин. Наибольший интерес представляет задача поиска сопряженных точек на стереопаре. Ведутся активные разработки в этой области. Существуют рейтинги алгоритмов с метриками Middlebury, KITTI, ETH3D и другие. Сейчас наиболее успешно с задачей построения карты диспаратности справляются алгоритмы на основе нейронных сетей [8-10]. Однако такие алгоритмы ресурсоемкие и требует большого объема обучающих данных. Менее стабильно работают детерминистические алгоритмы, однако они более легковесны и подойдут для задач первичной обработки, где быстро требуется построить карту глубин для стереопары или для подмножества точек. Разработка таких алгоритмов также ведется, например, алгоритмы [11-18]. Есть открытая реализация в популярной библиотеке OpenCV.

Мы работаем с двумя алгоритмами. Первый легковесный детерминистический алгоритм [11, 12]. Для сопоставления точек на двух изображениях стереопары производится вычисление локальных признаков. Затем в некоторой области с помощью простой WTA-стратегии производится оптимизация функционала невязки векторов, описывающих точки. На рисунке 3 представлены результаты работы алгоритма.

Рисунок 3 — Примеры результатов детерминистического алгоритма

Для построения гладких карт по всей стереопаре используется нейросетевая модель на основе [19] (рис. 4).

Нейронная сеть представлена каскадной рекуррентной архитектурой. По исходным изображениям стереопары с помощью сверточных слоев независимо формируются трехуровневые пирамиды с извлеченными векторами признаков. Каждый уровень пирамиды хранит признаки для изображений разных масштабов. Далее

по извлеченным признакам последовательно от меньшего масштаба к большему вычисляется корреляция точек и обновляются сдвиги на карте диспаратности. Для этого используется особая рекуррентная модель. На рисунке 5 представлены результаты работы алгоритма.

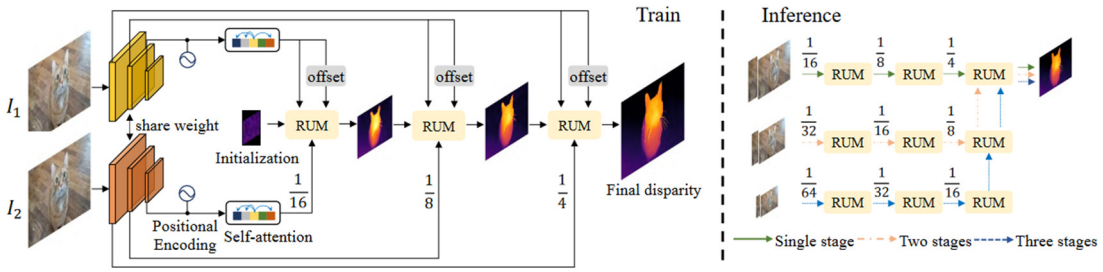


Рисунок 4 — Нейросетевая модель построения карт диспаратности [19]

Рисунок 5 — Пример результата нейросетевой модели

По карте диспаратности и известным параметрам системы вычисляются карта глубин и карта расстояний.

Возможности разработки

Программа включает в себя процедуру калибровки камер стереосистемы по фотографиям калибровочного макета. В качестве калибровочного макета используется плоская шахматная доска с известным количеством, расположением и размером ячеек. После выполнения калибровки мы получаем параметры камер стереосистемы такие как: коэффициент, характеризующий фокусное расстояние камер и размер пикселя матрицы фотоприемника, величину базы (расстояние между камерами), коэффициенты дисторсии для каждой камеры.

Программный интерфейс позволяет визуализировать исходные изображения стереопары, построенные карты, проводить их анализ и разметку (рис. 6). Пары могут подгружаться как отдельные изображения с диска, так и в поточном режиме напрямую с камер. Для изображений 768x1024 пикселей с использованием NVIDIA RTX 2070 производительность ~0.5 кадров в секунду. С потерей качества карт производительность может быть повышена.

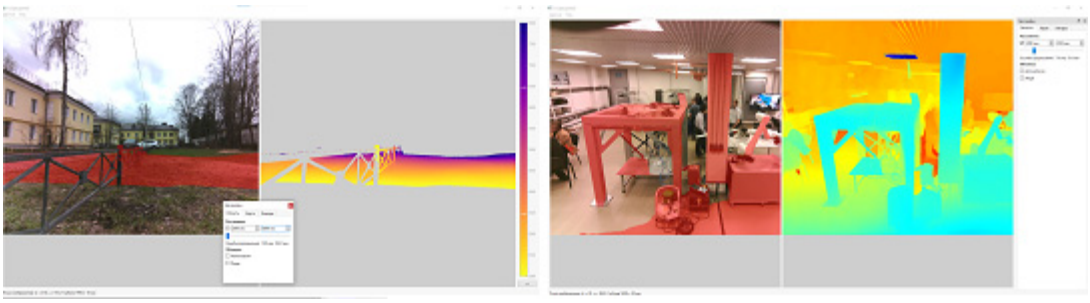


Рисунок 6 — Программный интерфейс. Выделение диапазонов расстояний на открытом пространстве и в помещении

Дополнительно в системе добавлена семантическая сегментация. Используется нейросетевая модель [20]. Сейчас для выделения доступны области изображения с людьми и автомобилями (рис. 7).

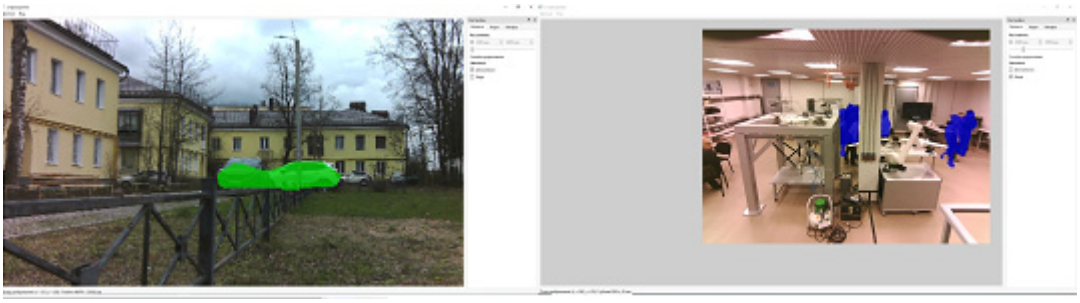


Рисунок 7 — Программный интерфейс. Сегментация объектов на открытом пространстве и в помещении

Разработан и изготовлен штатив для расположения стереосистемы вне помещений с мерами защиты камер от влаги, пыли и прямого солнечного света. Разработан крепеж стереосистемы для квадрокоптера (рис. 8).

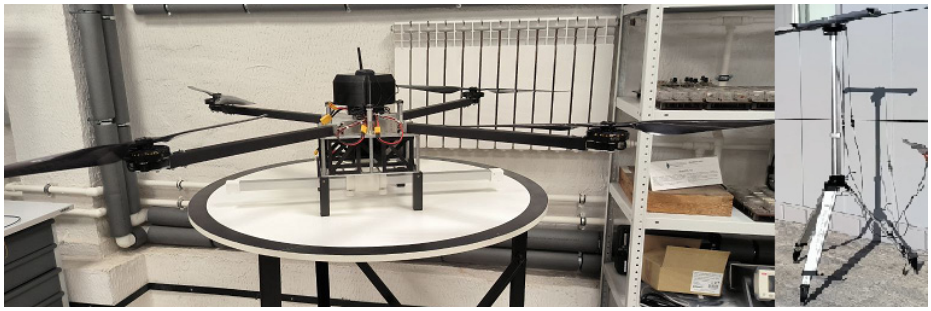


Рисунок 8 — Крепления камер

Проблемы и планы развития

На данный момент существует ряд задач по улучшению работы системы. Необходимо улучшить качество и устойчивость калибровки камер для применения системы на больших расстояниях.

Сейчас для обучения системы мы используем открытые наборы данных. Для увеличения точности на больших расстояниях необходимо работать со стереопарами большего разрешения, для обучения модели необходимо подготовить свой набор данных. Для начала планируется провести эксперимент на синтетическом датасете, собранным по смоделированной 3д-сцене. Для стереопар большего разрешения остро встает вопрос производительности, необходимо оптимизировать модель и ускорить вычисления.

Для уменьшения объема данных, передаваемых между беспилотной системой и контрольным пунктом, необходимо обрабатывать видеопоток на стороне беспилотника. В ходе экспериментов пришли к выводам, что мини компьютеры с графическими процессорами (Nvidia Jetson Orin) не обладают достаточной производительностью для поточного вычисления карт диспаратности. Планируется перенос наших алгоритмов на ПЛИС.

Планируется добавление функционала для разметки движущихся объектов и определения характера их движения. Планируется доработка штативов с добавлением двигателей для позиционирования камер, добавление датчиков для глобального позиционирования системы и наблюдаемых ею объектов. Ведутся работы по внедрению технического стереозрения в беспилотный подводный аппарат.

Литература

1. И. С. Грузман, В. С. Киричук, В. П. Косых, Г. И. Перетягин и А. А. Спектор, Цифровая обработка изображений в информационных системах, Новосибирск: НГТУ, 2002, с. 6.
2. Z. Zhang, «A flexible new technique for camera calibration», IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence, 2000, voll. 22, №. 11, pp. 1330-1334. 10.1109/34.888718
3. G. Korn and T. Korn, Handbook of Mathematics, Moscow: Nauka, 1973.
4. J. Bard, Nonlinear parameter estimation, Moscow: Statistica, 1979.
5. S. M. Ustinov and V. A. Zimnitsky, Computational Mathematics, St. Petersburg: BHV-Petersburg, 2009.
6. J. E. Dennis and R. B. Schnabel, Numerical methods for unconstrained optimization and nonlinear equations, Philadelphia: SIAM, 1983.
7. J. Nocedal ans S. Wright, Numerical optimization, series in operations research and financial engineering, New York: Springer, 2006.
8. G. Xu, X. Wang, X. Ding and X. Yang, «Iterative geometry encoding volume for stereo matching», Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2013, pp. 21919-21928. 10.1109/CVPR52729.2023.02099.

9. J. Li, P. Wang, P. Xiong, T. Cai and Z. Yan, «Practical stereo matching via cascaded recurrent network with adaptive correlation», Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2022, pp. 16263-16272. arXiv:2203.11483.

10. H. Zhao, H. Zhou, Y. Zhang and J. Chen, «High-frequency stereo matching network», Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2023, pp. 1327-1336. 10.1109/CVPR52729.2023.00134.

11. A. Zhilenkov and O. Krupinin: Unsupervised 3D Scene Reconstruction by Stereo Pair Images // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2024. 915 – 921. 10.1109/ICIEAM60818.2024.10553810.

12. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023680069 Российская Федерация. Определение расстояния по данным системы стереографического технического зрения: № 2023668808: заявл. 13.09.2023: опубл. 26.09.2023 / А. А. Жиленков, О. С. Крупинин; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет». – EDN ESKDAM.

13. A. Ansar, A. Castano, and L. Matthies, «Enhanced real-time stereo using bilateral filtering», Proceedings. 2nd International Symposium on 3D Data Processing, Visualization and Transmission, 2004, pp. 455-462. 10.1109/TDPVT.2004.1335273.

14. D. Scharstein and R. Szeliski, «A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms», International journal of computer vision, 2002, voll. 47, pp. 7-42. 10.1023/A:1014573219977.

15. R. Fan, Y. Liu, M. J. Bocus and L. Wang, «Real-time subpixel fast bilateral stereo», IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA), 2018, pp. 1058-1065. 10.1109/ICInfA.2018.8812594.

16. R. Fan, X. Ai and N. Dahnoun, «Road surface 3D reconstruction based on dense subpixel disparity map estimation», IEEE Transactions on Image Processing, 2018, voll. 27, №. 6, pp. 3025-3035. 10.1109/TIP.2018.2808770.

17. X. Mei, X. Sun, M. Zhou, S. Jiao and H. Wang, «On building an accurate stereo matching system on graphics hardware», IEEE International Conference on Computer Vision Workshops (ICCV Workshops), 2011, pp. 467-474. 10.1109/ICCVW.2011.6130280.

18. Y. Zhan, Y. Gu, K. Huang and C. Zhang, «Accurate image-guided stereo matching with efficient matching cost and disparity refinement», IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2015, voll. 26, №. 9, pp. 1632-1645. 10.1109/TCSVT.2015.2473375.

19. J. Li, P. Wang, P. Xiong, T. Cai and Z. Yan: Practical Stereo Matching via Cascaded Recurrent Network with Adaptive Correlation// IEEE *CVF Confer.ence on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2022, 16242-16251, 10.48550/arXiv.2203.11483.

20. L. Chen, Y. Zhu, G. Papandreou, F. Schroff and H. Adam: Encoder-Decoder with Atrous Separable Convolution for Semantic Image Segmentation// *Proceedings of the European conference on computer vision (ECCV)*, 2018, 801-818. 10.48550/arXiv.1802.02611.

Система навигации для испытаний беспилотных наземных роботизированных комплексов

Г.М. Исраелян✉, Е.О. Гаранин, А.А. Назаров
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донской государственный технический университет» (ДГТУ), г. Ростов-на-Дону, обл. Ростовская, Россия, Israelyan-harry@mail.ru

Аннотация
В работе проводится синтез системы управления беспилотным транспортным средством для испытаний наземных робототехнических комплексов. Описывается конструктивное исполнение узлов для управления ТС. Рассматриваются системы очувствления робота для решения задач глобального и локального позиционирования, построения карты окружения, построения маршрута движения по заданным координатам. Описывается работа алгоритмов, предназначенных для навигации беспилотника. Приводятся результаты моделирования всего робототехнического комплекса в среде симуляции роботов.

Ключевые слова
Беспилотное транспортное средство, система навигации, система управления, система технического зрения, инерциальная система навигации, глобальная навигационная спутниковая система, одометрия.

Благодарности
Выражаем благодарность Министерству науки и высшего образования РФ за поддержку проекта «Формирование комплекса технологических решений по модернизации разработанной электрической платформы под существующие агротехнологические требования применяемого на платформе навесного оборудования» (FZNE-2024-00021).

Navigation system for testing unmanned ground-based robotic systems

Harry M. Israelyan✉, Evgeny O. Garanin, Alexander A. Nazarov
Don State Technical University (DSTU), Rostov-on-Don, Rostov Oblast, Russia, Israelyan-harry@mail.ru

Abstract
The work includes the synthesis of an unmanned vehicle control system for testing ground-based robotic systems. The design of the nodes for vehicle control is described. Robot sensing systems are considered for solving problems of global and local positioning, building an environment map, and building a route along specified coordinates. The work of algorithms designed for drone navigation is described. The results of modeling the entire robotic complex in a robot simulation environment are presented.

Key words
Unmanned vehicle, navigation system, control system, vision system, inertial navigation system, global navigation satellite system, odometry.

Acknowledgements
We express our gratitude to the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for supporting the project «Formation of a complex of technological solutions for the modernization of the developed electric platform to meet the existing agrotechnological requirements of the attachments used on the platform» (FZNE-2024-00021).

Введение

На сегодняшний день высокая актуальность сохраняется за автономными робототехническими системами. Речь идет о беспилотниках общего и специального назначения. Все больше исследователей участвует в разработке и исследовании беспилотных наземных транспортных средств (НТС), сфера применения которых ориентирована на городскую среду. Немаловажными, также, являются отрасли специального назначения: сельскохозяйственная, горнодобывающая, логистическая и другие актуальные для внедрения сферы. Согласно стратегии научно-технологического развития Российской Федерации, на период до 2030 года предусматривается создание автомобилей с интеллектуальными системами, автопилотами до 4-ого уровня автономности [1].

Система, описанная в данной работе, разрабатывалась для участия в открытых испытаниях беспилотных транспортных систем (БТС). Основная концепция заключается в модернизации и дооснащении серийных автомобилей роботизированным комплексом, обеспечивающим движение без участия водителя на этапе тестирования техники на полигоне, не применяя существенных конструктивных изменений [2]. Испытания имеют

несколько заданий. Полигон основного этапа испытаний представляет из себя грунтовую дорогу в форме дуги протяженностью около 200 метров с расположенными на ней статичными препятствиями в виде бочек и барьеров высотой более 0.5м. По бокам дороги установлены ограждения по всей длине.

Первичная задача транспортного средства - достигнуть конца участка и вернуться в зону старта-финиша, объезжая все препятствия. Вторичные задания включают: движение по полигону с соблюдением требований дорожного движения, параллельная парковка, перпендикулярная парковка задним ходом.

Материалы и методы

В качестве платформы для развертывания высокоуровневой системы управления на роботе установлен компьютер с процессором Intel i7 12 поколения с интегрированной графической картой и 16 гб оперативной памяти под управлением операционной системы Ubuntu 22.04.03 LTS (Jammy Jellyfish).
Все электромеханические узлы для взаимодействия с рабочими органами автомобиля (педали, МКПП, руль) оснащены блоками управления на базе микроконтроллера STM32 и связаны с бортовым компьютером по CAN шине (см. рис. 1).

Рисунок 1 — Аппаратное оснащение беспилотной системы

Для локализации и позиционирования БТС оснащено глобальной и инерциальной навигационными системами. Установлены датчики колесной одометрии: датчики скорости задних колес, датчик угла поворота рулевого вала [3]. Для распознавания препятствий и картостроения на переднем и заднем бампере установлены стереокамеры.

Педальный узел представляет из себя два мотор-редуктора, которые через механизмы с тросами соединяются с педалью тормоза и сцепления, причем, механическое усилие, которое создается редуктором и рычагом позволяют удерживать педали в любом состоянии с отсутствующим электропитанием. Два концевых переключателя для каждой педали осуществляют обратную связь для обнаружения состояния педалей. Алгоритм предполагает прямое воздействие на мотор для вращения в требуемом направлении и остановки при нажатии на концевой переключатель.

Узел подруливания состоит из ролика с электромотором, который с помощью винта прижимается к рулевому колесу, а также абсолютным энкодером, соединенным через редуктор к рулевому валу, таким образом, чтобы 1 оборот энкодера соответствовал полному диапазону вращения руля.

Узел роботизированного комплекса для управления механической коробкой передач состоит из двух актуаторов, которые напрямую соединяются с тягами переключения, то есть штатный рычаг МКПП снят. Для обратной связи по положению каждой тяги установлены линейные энкодеры.

Для реализации системы навигации НТС был предложен подход комбинированного использования инерциальной (ИНС) и глобальной спутниковой (ГНСС) навигационных систем.

В качестве чувствительного элемента ИНС выступает инерциальный датчик ADIS16480, состоящий из акселерометров, датчиков угловой скорости (ДУС) и магнитометров. Каждый из указанных в составе датчика элементов позволил получить измерения кажущегося ускорения, угловой скорости и величины магнитного поля по трем ортогональным осям пространства [4]. В рамках настоящей работы реализована библиотека, написанная на языке С, которая позволяет считывать ускорения и углы Эйлера с датчика ADIS через интерфейс SPI. Считывание, обработка значений и дальнейшая отправка на ЭВМ верхнего уровня осуществляется с помощью микроконтроллера STM32 на базе ядра Cortex-M4. Демонстрация работоспособности была проведена при помощи программного пакета Matlab (см. рисунок 2). Для этого реализована функция для отправки с микроконтроллера по интерфейсу UART в рабочее пространство Matlab.

Визуальная оценка полученных графиков позволяет сделать вывод о корректной работе алгоритма чтения и отправки инерциальных данных.

Глобальное позиционирование НТС осуществляется при помощи спутниковой навигации. Для этого был использован готовый одноантенный модуль ГНСС с выходом USB. Для дальнейшего чтения и использования полезных данных с модуля, был написан драйвер для бортового компьютера, который позволяет обрабатывать NMEA пакеты.

Программное обеспечение развернуто внутри фреймворка для роботов ROS2 Humble. Он содержит основные подпрограммы (ноды) для связи с микроконтроллерами нижнего уровня, преобразования и обработки

данных, поступающих с сенсорных систем робота, получения данных с пользовательского интерфейса и основные программные модули для навигации, картостроения, построения траектории движения и преобразования их в исполнительные параметры (см. рис. 3). Программы написаны преимущественно на языке Python 3.11. Те алгоритмы, которые предполагают сложные математические вычисления реализованы на языке C++, для достижения высокого уровня производительности.

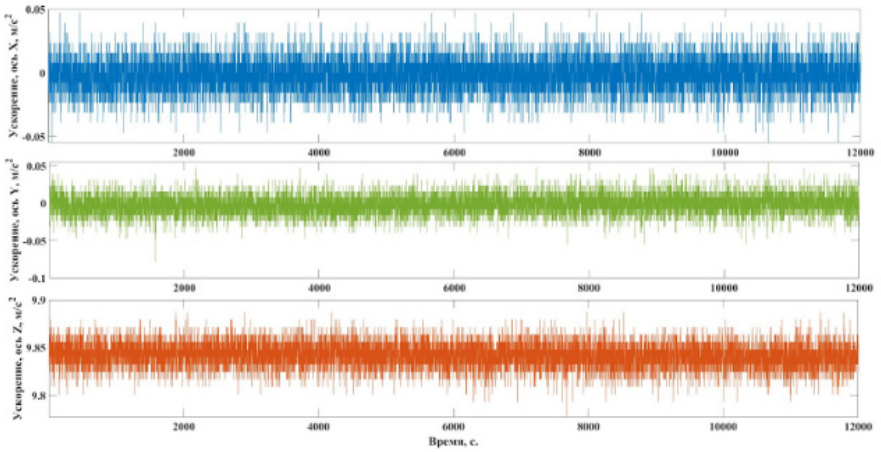


Рисунок 2 — График полученных измерений кажущегося ускорения с датчика ADIS16480

Рисунок 3 — Структура программного обеспечения верхнего уровня

Для объединения всех микроконтроллеров и связи с бортовым компьютером был задействован интерфейс CAN. Основным преимуществом CAN можно выделить передачу информации по двухпроводной системе и передаче информации бортовому компьютеру через CAN-USB преобразователь. В качестве протокола для передачи информации использовался J1939. Выбор данного решения исходит из наполненной технической документации, в которой содержатся большинство необходимых стандартизированных parameter group number (PGN). Используя эту информацию, в рамках настоящей работы был написан драйвер для формирование управляющих параметров в 3 ключевые группы PGN: для педального узла, МКПП и системы навигации. Для всех алгоритмов узлов реализованы как информационные сообщения передачи данных в бортовой

компьютер, так и сообщения об ошибках, для обнаружения неполадок, связанных с мотором, драйвером мотора, концевым переключателем или механизмом троса.

Данные о скорости, инерциальной системы и глобальной навигационной системы поступают в бортовой компьютер для совмещения всех этих данных: координат, скоростей и ускорений по всем осям (X,Y,Z,roll,pitch,yaw,X˙,Y˙,Z˙,roll˙,pitch˙,yaw˙,X¨,Y¨,Z¨) и получения одометрии скорректированной из трех источников с помощью расширенного фильтра Калмана [5].

Драйвер камеры передает бортовому компьютеру цветную картинку и картинку глубины каждого пикселя (см. рис. 4). Предварительная калибровка и, соответственно, матрица калибровки, используется для генерации облака точек [6] во фронтальной и тыльной области движения БТС. Ввиду ограниченных вычислительных возможностей, а также отсутствия необходимости строить трехмерную карту окружения, облако точек сужается до двумерного сканирования препятствий для построения сетки занятости (Occupancy Grid) [7] вокруг автомобиля. Цветное изображение фронтальной камеры используется для детекции и распознавания дорожных знаков и сигналов светофора, при помощи заранее обученной нейронной сети YOLOv8 [8].

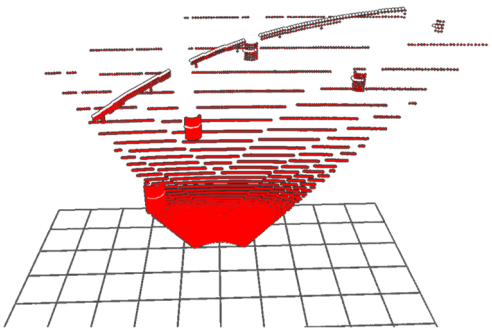


Рисунок 4 — Облако точек, полученное с камеры БТС

Классическая сетка занятости представляет из себя двумерную матрицу каждая ячейка которой содержит информацию о наличии препятствий, рисунок В. Таким образом, с помощью алгоритма гибридного астар (Hybrid A*) [9] можно просчитывать траекторию движения робота, учитывая при этом автомобильную (аккерманскую) кинематику [10]. Алгоритм просчитывает возможные маршруты движения по сетке исключительно в прямом и обратном направлении с отклонениями рулевых колес, согласно характеристикам автомобиля, голономное движение исключено (см. рис. 5). Для предотвращения коллизий алгоритм также учитывает габариты ТС, прикладывая двумерную проекцию ТС на сетку занятости во время расчета траектории, ограничивая тем самым возможные направления, которые приведут к столкновению.

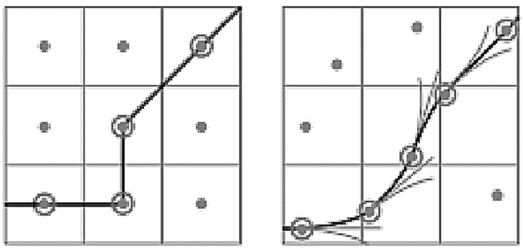


Рисунок 5 — Сравнение принципов работы классического A* (слева) и гибридного (справа) [9]

Помимо текущей локальной карты окружения, которую БТС строит на основе данных сенсоров в их области действия, модуль картостроения, на основе данных одометрии и локальной карты строит глобальную сетку занятости с размером, который увеличивается по мере движения ТС по полигону.

Траектория передается в контроллер маршрута, который с помощью ПИД-регуляторов положения рулевого колеса и скорости автомобиля генерирует требуемые параметры движения, согласно кинематике ТС. Далее контроллер движения формирует законы управления и сообщения для передачи их по CAN шине на нижний программный уровень. Контроллер также осуществляет отработку ошибок, приходящих от электромеханических узлов управления ТС, то есть расшифровку, вывод этих ошибок на экран и экстренное торможение в случае необходимости.

Результаты

Были проведены лабораторные испытания узлов и аппаратного обеспечения БТС для отработки всех команд управления, сенсоров, а также механических узлов, установленных на серийный автомобиль. Испытания успешно продемонстрировали все вышеперечисленные аспекты и доказали работоспособность навесного оборудования.

Большая часть данных: карты окружения, траектория, распознанные знаки, изображения с камер, сообщения об ошибках и т.д. визуализированы в пользовательском интерфейсе, для контроля оператором состояния автомобиля. Также интерфейс обеспечивает возможность выбора точки движения БТС относительно глобальной спутниковой карты. При задании глобальных координат движения происходит их пересчет в локальную систему координат ТС.

Разработанное программное обеспечение было протестировано на подготовленном виртуальном полигоне в среде симуляции GZ SIM (см. рис. 6). В результате тестов робот выполнял все требуемые задачи.

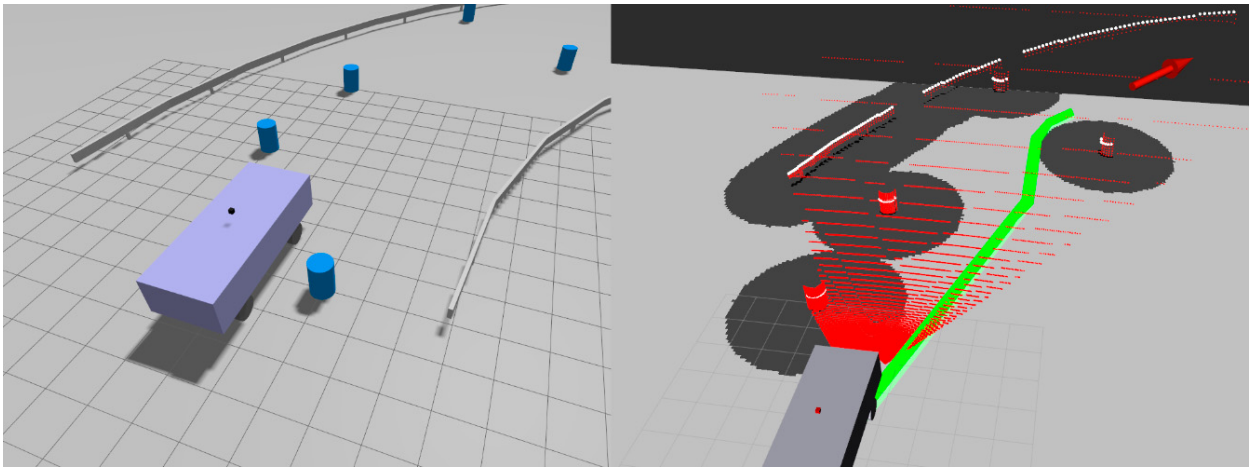


Рисунок 6 — Моделирование БТС с полигоном в среде симуляции: слева – полигон и ТС в среде симуляции GZ SIM, справа – интерфейс с визуализацией данных

Это позволило устранить возникающие недостатки, связанные с построением маршрута при выполнении маневров на дороге, а также увеличить быстродействие системы путем переработки структуры некоторых алгоритмов до проведения первых полевых испытаний на серийном транспортном средстве. В результате моделирования удалось оценить производительность ПО. Время, требуемое для выполнения одной итерации цикла управления, то есть обработки сенсоров, построения траектории, карты и отправки данных по CAN шине составило 20 микросекунд, что определяет частоту работы как 50 Гц. Такой скорости работы достаточно для движения БТС до 18 км/ч (согласно регламенту испытаний).

Литература

1. О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации: указ Президента РФ от 28.02.2024 № 145 // Официальный интернет-портал правовой информации. 2024. 28.02.

2. РобоКросс Полевые испытания беспилотных робототехнических систем. / [Электронный ресурс] // russianrobotics : [сайт]. — URL: https://www.russianrobotics.ru/competition/robocros/ (дата обращения: 30.08.2024).

3. Системы автоматизации транспортных средств / И. Н. Ефременко, В. Е. Большев, Е. О. Гаранин [и др.]. – Ростов-на-Дону : Донской государственный технический университет, 2022. – 129 с. – ISBN 978-5-7890-2082-1. – EDN IMHSUY.

4. Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем / В.В. Матвеев, В.Я. Распопов / Под общ. ред. д.т.н. В.Я. Распопова. - СПб.: ГНЦ РФ ОАО "Конферн "ЦНИИ "Электроприбор", 2009. - 280 с. ISBN 978-5-900780-73-3.

5. M. Peiris, H. Lang, M. El-Gindy Kalman filter-based sensor fusion for Ackermann steering mobile robots / Journal of Physics: Conference Series, 2024, 2811. 012004. 10.1088/1742-6596/2811/1/012004.

6. S. Fortuna, S. Chiodini, A. Valmorbida, M. Pertile ROS 2 Integrated Continuous Terrain Mapping Comparison for Autonomous Navigation in Unstructured Environments / 2024 11th International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace), Lublin, Poland, 2024, P. 128-133, doi: 10.1109/MetroAeroSpace61015.2024.10591560.

7. A. Bonci, F. Gaudeni, MC. Giannini, S. Longhi Robot Operating System 2 (ROS2)-Based Frameworks for Increasing Robot Autonomy: A Survey / Applied Sciences, 2023, 13(23):12796. https://doi.org/10.3390/app132312796.

8. Ultralytics YOLOv8 // ultralytics URL: https://docs.ultralytics.com/models/yolov8/ (дата обращения: 10.06.2024).

9. M. Montemerlo, J. Becker, S. Bhat, H. Dahlkamp, D. Dolgov, S. Ettinger, D. Haehnel, T. Hilden, G. Hoffmann, B. Huhnke, D. Johnston, S. Klumpp, D. Langer, A. Levandowski, J. Levinson, J. Marcil, D. Orenstein, J. Paefgen, I.

Penny, S. Thrun. Junior: The Stanford Entry in the Urban Challenge / Journal of Field Robotics, 2008, 25. 569 - 597. 10.1002/rob.20258.

10. Иоффе М. Л. ПРИНЦИП АККЕРМАНА И ЕГО РЕАЛИЗАЦИИ В СОВРЕМЕННЫХ АВТОМОБИЛЯХ // Известия вузов. Машиностроение. 2021. №9 (738).

Информация об авторах

Исраелян Гарри Михайлович, программист, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донской государственный технический университет» (ДГТУ), Россия, 344010, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1, Israelyan-harry@mail.ru, ORCID: 0000-0001-9897-4855

Гаранин Евгений Олегович, н.с., ДГТУ, Россия, 344010, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1, egaranin@donstu.ru, ORCID: 0000-0001-6266-0301

Назаров Александр Александрович, программист, ДГТУ, Россия, 344010, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1, alexandrnazarov32@gmail.com, ORCID: 0000-0001-8111-2626

Разработка мобильной роботизированной платформы botANNIC

С.А. Сенкевич✉, Д.А. Бобров, В.А. Бугров
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «ТГТУ»), г. Тамбов, Россия, thegreatarchitect1424@gmail.com

Аннотация
В статье приводится описание технического обеспечения мобильной роботизированной платформы botANNIC. Рассмотрена механическая часть платформы, приведены технические характеристики используемых электродвигателей и аккумуляторной батареи беспилотной платформы. Также описана информационно-измерительная система, ее составляющие. Отдельное внимание уделено построению локальной системы координат. Рассмотрены режимы работы системы управления платформой, приведена информация о проведении полевых испытаний и их результатах.

Ключевые слова
Наземная платформа, техническое обеспечение, беспилотная платформа, система управления, информационно-сенсорная система.

Благодарности
Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта «Разработка роботизированного комплекса наземной и воздушной беспилотных платформ для применения в агротехнологиях» (ЕГИСУ НИОКТР: 124062100023-3).

Development of the mobile robotic platform botANNIC

Sergei A. Senkevich✉, Daniil A. Bobrov, Vadim A. Bugrov
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Tambov State Technical University» (FSBEI HE «TSTU»), Tambov, Russia, thegreatarchitect1424@gmail.com

Abstract
The article describes the technical hardware of the mobile robotic platform botANNIC, which includes the mechanical components, the specifications of the electric motors and battery which are used in the unmanned platform. It also includes description of the information and measurement system and its elements, as well as the construction of a local coordinate system. Special attention is given to the modes of operation for the platform's management system. The data on field tests and results are provided in this article.

Key words
Ground platform, technical hardware, unmanned platform, control system, information and sensor system.

Acknowledgements
The study was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the project «Development of a robotic complex of ground and air unmanned platforms for use in agricultural technologies» (EGISU NIOKTR: 124062100023-3).

В наше время мобильные роботизированные платформы используются во многих сферах жизнедеятельности человека. Особенно хорошо мобильные платформы зарекомендовали себя для решения задач автоматизации производств, в том числе в сельском хозяйстве.

Основным направлением развития мобильных роботизированных платформ является переход от управляемых оператором роботов к автономным мобильным роботам, наделенным собственными интеллектуальными системами управления. В этом случае человек определяет конечные цели для роботизированной платформы, а оставшуюся работу по построению маршрута передвижения берет на себя интеллектуальная система робота. В сельском хозяйстве они находят применение для автоматизированного контроля качества овощей и фруктов, их сбора и обработки.

Для выполнения перечисленных выше задач разработана мобильная роботизированная платформа botANNIC. Платформа представляет собой двухосную тележку с колесами повышенной проходимости. Внешний вид платформы показан на рисунке 1. Грузоподъемность платформы составила 150 кг.

В качестве питания был выбран аккумулятор LiFePO4. Это легкий и компактный литий-железо-фосфатный аккумулятор – функциональное устройство, оснащенное защитной BMS-платой, а также балансирами для стабилизации работы. Рассчитан на эксплуатацию в широком температурном диапазоне от – 20 до + 60С°,

выдерживает перепады давления, не подвержено деформации и старению. Его номинальное напряжение зависит от габаритных размеров (определенного типоразмера, а также форм-фактора), при этом он отличается стабильностью данного показателя.

Питание данной платформы осуществляет литий-железо-фосфатный аккумулятор с напряжением 60В, закрепленный в специальном корпусе. Он был выбран из-за своей более низкой стоимости, высокой безопасности, низкой токсичности, длительного срока службы и других факторов.

Платформа оснащена датчиками расстояния сенсорного типа в количестве 4 шт. позволяющими не допустить столкновения с объектами. Сенсорные датчики подключены к контроллеру ArduinoUno через преобразователи сигнала. Для беспроводной связи с платформой на ней был закреплён роутер Wi-Fi подключенный к промышленному компьютеру, расположенному в блоке управления.

Рисунок 1 — Мобильная роботизированная платформа botANNIC

Платформа оснащена двумя электродвигателями, выполняющими роль мотора. Технические характеристики двигателей приведены в таблице 1. Каждый электродвигатель отвечает за работу собственной стороны платформы. Один электродвигатель отвечает за работу двух левых колес платформы, другой – за работу двух правых колес. Благодаря этому платформа имеет возможность разворота на месте, что делает её более мобильной. Электродвигатель с колесами соединён с помощью цепной передачи понижающего типа, что позволяет повысить тягу данной платформы, следовательно, и её проходимость.

Таблица 1 — Технические характеристики электродвигателя 2ПБ100МУХЛ4

Наименование показателей	**Величина**
Номинальная мощность $P_Н$, кВт	0,37
Напряжение $U_Н$, В	60
Номинальная частота вращения $n_Н$, об/мин	1500
Максимальная частота вращения n_{max}, об/мин	3000
КПД η, %	67,5
Сопротивление обмотки якоря $R_{об}$, Ом	7,74
Индуктивность обмотки двигателя $L_{ДВ}$, Гн	0,199
Момент инерции двигателя $J_{ДВ}$, кг·м2	0,005
Момент инерции номинальный $J_Н$, кг·м2	2,32
Передаточное число редуктора i	12,5
Сопротивление R, Ом	100
Напряжение АЦП U_1, В	-5…+5
Напряжение ЦАП U_2, В	-5…+5
Период квантования $T_В$, с	0,01
Момент нагрузки $M_Н$, Н·м	2,35
Диапазон измерений датчика угла СП4-10, º	0,,,360

Управление роботизированной платформой осуществляется как в ручном режиме с использованием оператором пульта управления, так и в автоматическом режиме с использованием алгоритмов, разработанных в среде ROS (Robot operating system) [1]. Взаимодействие оператора и платформы в ручном режиме, а также

загрузка алгоритма управления осуществляется с помощью блока управления. Блок управления – это управляющий орган, он осуществляет сбор данных с датчиков, связь между компонентами платформы и обработку полученных данных. Блок управления) включает в себя: промышленный компьютер, контроллер ArduinoUno, преобразователь напряжения, реле и шины питания. Структурная схема системы управления движением платформы представлена на рисунке 2.

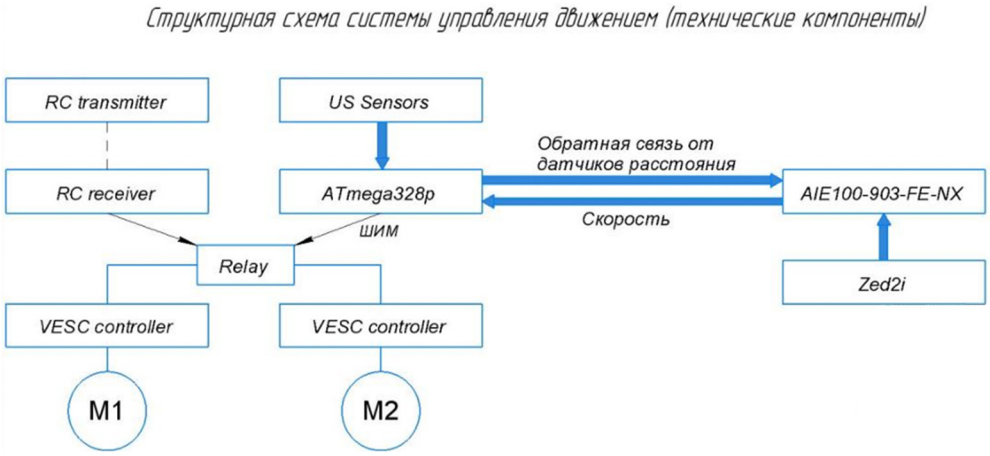


Рисунок 2 — Структурная схема системы управления движением

Колесная робототехническая платформа имеет возможность передвигаться автономно, при помощи программы и датчиков (US Sensors), а также при помощи Пульта Управления (RC transmitter). Переключение между режимами осуществляет реле (Relay). Управление электродвигателями (M1, M2) осуществляет контроллер (VESC controller). Пульт управления подаёт сигнал на приёмник (RC receiver), который в свою очередь посылает сигнал на реле, тем самым переключает сигнал на управление колесной робототехнической платформой с пульта управления. В случае автономного перемещения, управление VESC контроллерами выполняет промышленный компьютер (AIE100 903-FE-NX). Сигнал с компьютера поступает на ШИМ контроллер (Atmega328p) после чего реле (Relay) переключает управление с пульта управления на компьютер. Компьютер получает информацию с помощью камеры, установленной на платформе, а также с помощью сенсорных датчиков (US Sensors). Полученные данные с датчиков способствуют безопасному передвижению колесной робототехнической платформы. VESC-контроллер управляет непосредственно электродвигателем.

Определение положения платформы в пространстве, передача координат осуществляется с помощью технологии ГЛОНАСС. Информационно-сенсорная система платформы botANNIC также включает в себя четыре ультразвуковых датчика для определения расстояния до окружающих объектов и предотвращения столкновений платформы с ними, а также стереокамеру, которая в дополнение к системе глобальной навигации формирует локальную систему с помощью создания пространственной карты сада, в которой отслеживается расстояние до объектов и положение платформы среди них [2–3].

Локальная система навигации позволяет ориентироваться платформе там, где установить связь со спутниковой системой не представляется возможным. К таким территориям можно отнести склады, крытые хранилища плодоовощной продукции, сортировочные и обрабатывающие цеха сельскохозяйственных предприятий. При постоянном перемещении из сада в одно из указанных помещений и обратно блок управления осуществляет переход с глобальной системы координат в локальную. В ручном режиме управления платформой переход осуществляется по команде оператора при помощи переданного сигнала с пульта на приемник платформы. При работе платформы в автоматическом режиме при потере соединения со спутниковой системой навигации ГЛОНАСС платформа полностью останавливается и при отсутствии сигнала в течение 10 секунд переходит на ориентацию в пространстве по локальной системе координат.

Как было сказано выше, основу локальной системы навигации составляет стереокамера ZED2i [2]. Она включает в себя два оптических объектива, с помощью которых отслеживается расстояние до окружающих платформу объектов. Внутреннее программное обеспечение камеры запоминает расстояние до каждого пикселя на изображения ведущего объектива и создает карту глубин. Карта глубин визуально, с помощью цвета показывает, насколько удален обнаруженный объект. Цвет объекта изменяется с красного для наиболее близких к стереокамере детектированных объектов до фиолетового, которым обозначаются объекты на значительном удалении от камеры. На рисунке 3 показано окно программного приложения стереокамеры. Слева вверху окна приложения выводится обычное двухмерное оптическое изображение сада, слева внизу формируется описанная выше карта глубин изображения. Правую часть окна приложения занимает полигональная сетка, формируемая на основании значений карты глубин. Элементарные полигоны формируют силуэты окружающих платформу объектов.

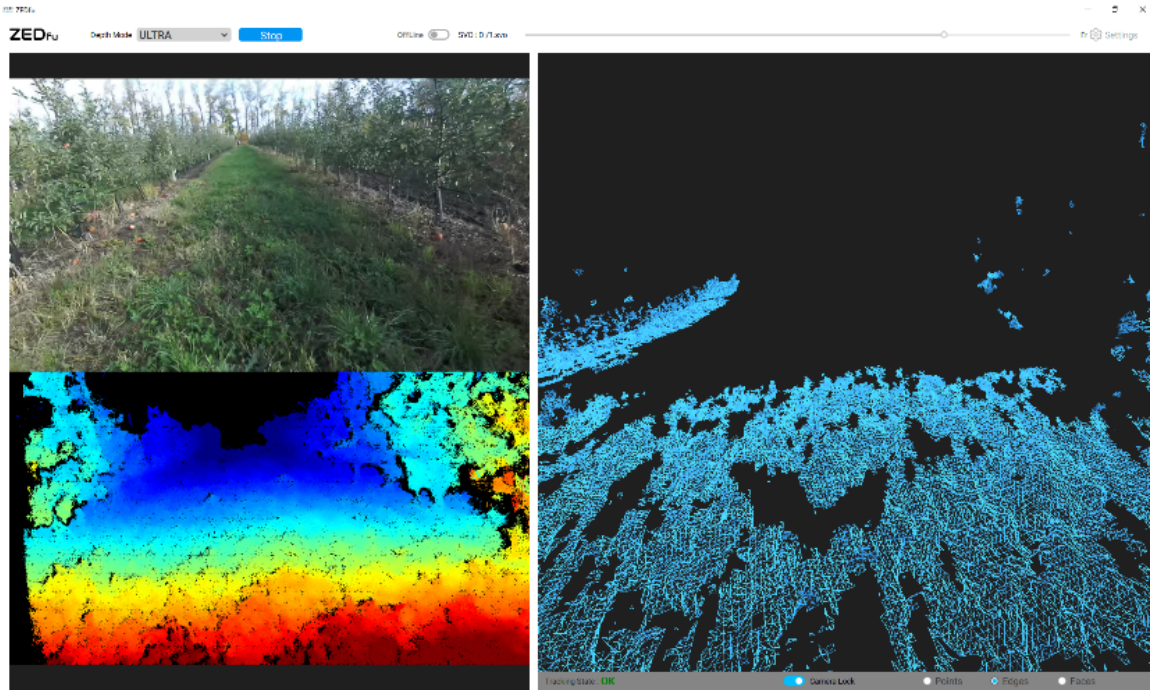


Рисунок 3 — Процесс построения пространственной карты

Стереокамера включает в себя также набор акселерометров и гироскопов. Они формируют массив информации об изменениях угловых и линейных ускорений при перемещении в пространстве в течение времени работы платформы. В ходе дальнейшей обработки данных при формировании локальной системы координат формируется путь (трек) платформы, который может быть выведен и отрисован на сформированной полигональной сетке. Построенная полигональная сетка показана на рисунке 4, на котором также отображен путь, пройденный платформой в данной системе навигации.

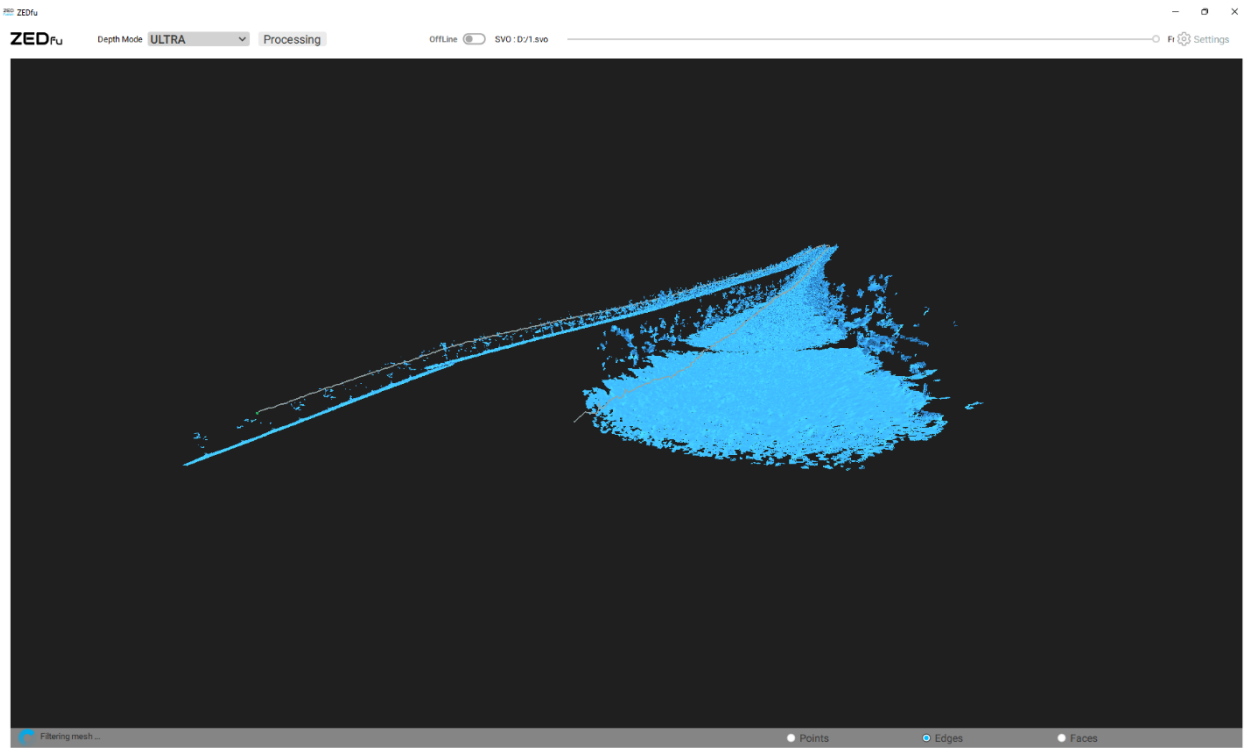


Рисунок 4 — Построенная полигональная сетка местности

Платформа прошла испытания в полевых условиях. В рамках испытаний был осуществлен проезд по территории яблоневого сада, расположенного в районе поселка Госпитомник Тамбовской области. Платформа осуществила объезд сада как в ручном режиме, так и автономном. В процессе автоматической обработки

изображения, полученного со стереокамеры, была успешно построена пространственная карта сада и пути роботизированной платформы в нем. Процесс построения пространственной карты для локальной системы навигации платформы показан на рисунке 3. Ошибка позиционирования платформы в сравнении с глобальной системой навигации составила не более 10 см.

На корпус роботизированной платформы есть возможность закрепления необходимого оборудования. На платформу могут монтироваться установка по опрыскиванию растений пестицидами, манипулятор для сбора яблок или аппаратный комплекс камер для контроля качества фруктов.

В дальнейшем предполагается интегрировать разработанную платформу botANNIC в систему, включающую также воздушную беспилотную платформу. Такая воздушная платформа будет осуществлять контроль качества плодов, совершать облет сада и передавать наземной платформе координаты деревьев и плодов, которым требуется определенная обработка или сбор урожая.

Литература

1. Чернухин, Ю. В. Мобильная робототехническая платформа с перестраиваемой гетерогенной системой управления / Ю. В. Чернухин // Известия Южного федерального университета. Технические науки – 2012. – № 1 (126). – С. 96–103.

2. Бобров, Д.А. Построение пространственной карты с помощью стереокамеры ZED 2i / Д.А. Бобров, В. А. Бугров, П. Ф. Маслов, С.А. Сенкевич // Цифровизация агропромышленного комплекса : Сборник научных статей III Международной научно-практической конференции, Тамбов, 25–27 октября 2022 года. Том 1. – Тамбов: Издательский центр ФГБОУ ВО "Тамбовский государственный технический университет", 2022. – С. 531-533.

3. Дивин, А.Г. Информационно-сенсорные системы мехатроники и роботизированные комплексы в неразрушающем контроле качества [Электронный ресурс] : учебное пособие. В 2-х ч. / А. Г. Дивин, П. В. Балабанов, Д. А. Любимова. – Тамбов : Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ».

Информация об авторах

Сенкевич Сергей Алексеевич, магистрант кафедры «Мехатроника и технологические измерения», инженер НИЛ «Интеллектуальные беспилотные робототехнические платформы», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение «Тамбовский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «ТГТУ»), Россия, 392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106/5, пом. 2, thegreatarchitect1424@gmail.com

Бобров Даниил Александрович, магистрант кафедры «Мехатроника и технологические измерения», инженер НИЛ «Интеллектуальные беспилотные робототехнические платформы», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Россия, 392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106/5, пом. 2, bigbrotheriswatchingyoubobrdan@yandex.ru

Бугров Вадим Александрович, магистрант кафедры «Мехатроника и технологические измерения», инженер НИЛ «Интеллектуальные беспилотные робототехнические платформы», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Россия, 392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106/5, пом. 2, bugor505@yandex.ru

Перспективная модель применения автономного необитаемого подводного аппарата с использованием управляемого изменения крена

Л.А. Мартынова✉, И.В. Пашкевич
Государственный научный центр Российской Федерации Акционерное общество Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» (АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»), Санкт-Петербург, Россия, martynowa999@bk.ru

Аннотация
Рассмотрены модели применения автономного необитаемого подводного аппарата при его нахождении в стесненных условиях подводных пещер или узкостей, при поиске полыньи нужного размера для обсервации по сигналам спутниковых навигационных систем при работе в ледовых условиях, при патрулировании акватории, дна и морской поверхности на мелководье. Показано, что в таких условиях ограничения зоны видимости и маневрирования существенно снижают безопасность аппарата. Для снижения риска повреждения аппарата предложено управляемое маневрирование аппарата по крену; определены силы и моменты, обеспечивающие изменение крена, условия, при которых возможно изменение крена. Приведен пример поиска полыньи требуемого размера, в котором за счет изменения крена обнаружение полыньи произошло в 10 быстрее с минимальным маневрированием по сравнению с описанным в литературе примером.

Ключевые слова
Автономный необитаемый подводный аппарат, подводные пещеры, узкости, ледовые условия, риск повреждения аппарата, управление изменением крена.

Благодарности
Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №23-29-00803, https://rscf.ru/project/23-29-00803/.

A promising model for the use of an autonomous underwater vehicle using controlled roll change

Lyubov A. Martynova✉, Ivan V. Pashkevich
Russian Scientific Center Joint Stock Company Concern «Central Research Institute «Elektropribor» (JSC Concern «Central Research Institute «Elektropribor»), St. Petersburg, Russia, martynowa999@bk.ru

Abstract
The article considers models of using an autonomous underwater vehicle when it is in the cramped conditions of underwater caves or narrows, when searching for a polynya of the required size for observation using signals from satellite navigation systems when working in ice conditions, when patrolling the water area, bottom and sea surface in shallow water. It is shown that in such conditions, limitations of the visibility zone and maneuvering significantly reduce the safety of the vehicle. To reduce the risk of damage to the vehicle, controlled maneuvering of the vehicle by roll is proposed; the forces and moments that ensure a change in roll, and the conditions under which a change in roll is possible are determined. An example of searching for a polynya of the required size is given, in which, due to a change in roll, the discovery of the polynya occurred 10 times faster with minimal maneuvering compared to the example described in the literature.

Key words
Autonomous underwater vehicle, underwater caves, narrows, ice conditions, risk of vehicle damage, roll control.

Acknowledgements
The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation No. 23-29-00803, https://rscf.ru/project/23-29-00803/.

Введение

Постоянное совершенствование технологий морских робототехнических комплексов [1] привело к возможности создания автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА), способных выполнять сложные задачи в течение длительного времени в удаленных труднодоступных районах [2]. Такими задачами являются:

- обследование льда в Арктическом и Антарктическом бассейнах;
- проведение съемки морского дна в целях поиска антропогенных объектов и полезных ископаемых на морском дне и в его толще, в том числе – в арктической зоне;

– патрулирование прибрежной зоны на мелководье с целью обнаружения маломерных подвижных и неподвижных объектов на морском дне и его толще, в морской среде и на ее поверхности;

– обследование боковых наклонных и вертикальных поверхностей, а также – вертикальных и горизонтальных складок рельефа морского дна или нижней кромки льда при встрече с препятствиями, которые необходимо обогнуть с минимальным расходом электроэнергии.

Выполнение работ в районах со сложным рельефом дна или нижней кромки льда сопряжено с риском попадания АНПА в ограниченное пространство – в узкости и пещеры, в которых затруднено маневрирование, и возникает риск повреждения корпуса АНПА и выступающих за пределы корпуса частей – винтов, рулей, антенн [3]. Все это создает угрозу безопасности АППА [4]. Для безопасного маневрирования АНПА в стесненных условиях или замкнутом пространстве АНПА должен иметь полный обзор вокруг себя, чтобы обоснованно найти выход из стесненных условий.

Для ведения поисковых действий под водой на борту АНПА имеются современные дорогостоящие средства технического зрения (СТЗ) для обследования дна, расположенные в подкильной зоне (рис. 1): гидролокатор бокового обзора (ГБО), многолучевой эхолот (МЛЭ), профилограф (ПФ) и абсолютный гидроакустический лаг (АГЛ). Для обследования льда [5] аналогичное оборудование расположено в верхней части корпуса АНПА.

Как видно из рисунка 1, ограниченность поля СТЗ приводит к возникновению мертвых зон, информация об окружающей обстановке в которых отсутствует и не позволяет АНПА безопасно маневрировать в стесненных условиях.

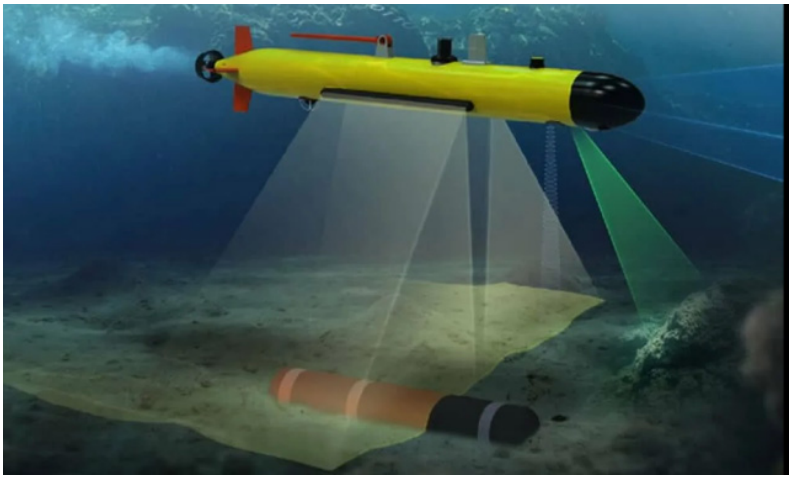


Рисунок 1 — Положение зон обзора средств технического зрения и мертвых зон

В связи с этим для освещения окружающей обстановки в стесненных условиях целесообразно обеспечить СТЗ возможностью обзора пространства в rкак в нижней, так и в верхней полусферах. Одним из способов решения указанной задачи является установка на АНПА дополнительной аппаратуры перечисленных комплексов СТЗ или, например, в ГБО, добавление функционала механического или электронного изменения угла наклона в вертикальной плоскости. Однако такой способ решения задачи привел бы к существенному усложнению конструкции АНПА, ухудшению его гидродинамических характеристик, а также существенному увеличению стоимости.

Поэтому с этим предлагается вместо оборудования АНПА дополнительными средствами – использовать уже имеющиеся на борту СТЗ. Для перевода зон обзора СТЗ, расположенных, например, в нижней полусфере под АНПА (рис. 1) – в верхнюю полусферу – необходимо обеспечить возможность маневрирования АНПА по крену.

Поскольку ранее все кораблестроение и эксплуатация судов были направлены на выравнивание крена, возникающего при маневрировании или при качке, то в связи с этим потребовалось исследование возможности управляемого изменения крена АНПА. Таким образом, для обследования поверхности дна, боковых поверхностей препятствий и других морских объектов естественного и антропогенного происхождения, поиска малоразмерных объектов на морской поверхности актуальным является управляемое изменение крена АНПА так, чтобы зоны обзора ГБО, МЛЭ, ПФ и АГЛ оказались направленными на обследуемую поверхность.

Целью работы явилось обоснование необходимости управляемого изменения крена в сложных условиях, угрожающих безопасности АНПА, определение условий, при которых возможно управляемое изменение крена, разработка моделей применения АНПА в сложных условиях с необходимостью управляемого изменения крена и оценка выигрыша от управляемого изменения крена.

На первом этапе исследований рассмотрим подробно тактические эпизоды с участием АНПА, в которых целесообразно применение управляемого изменения крена.

Задача маневрирования в пещерах и узкостях

При обследовании акватории со сложным рельефом дна или льда возможно попадание АНПА в стесненные условия, пример которых в вертикальной плоскости приведен на рис. 2. В таких условиях ему необходимо развернуться в вертикальной или горизонтальной плоскостях, то есть маневрировать по дифференту и/или по курсу. Для маневрирования необходимо иметь оперативную информацию об окружающем пространстве и о текущем положении АНПА в этом пространстве. Разворот по дифференту ограничен предельными углами дифферента, разворот по курсу требует пространства, превышающего двойную длину корпуса АНПА. Зеркала «заднего вида» или гидролокатор секторного обзора (ГСО), традиционно расположенный в носовой части АНПА, в корме у АНПА отсутствуют, что затрудняет безопасное маневрирование. Для всестороннего обследования стесненного пространства вокруг АНПА необходимо направлять зоны обзора средств обнаружения вокруг АНПА во всем диапазоне углов от 0° до 360° в горизонтальной и в вертикальной плоскостях. Из-за стесненных условий, единственной возможностью обследовать поверхность для определения безопасного пути АНПА является маневрирование по крену.

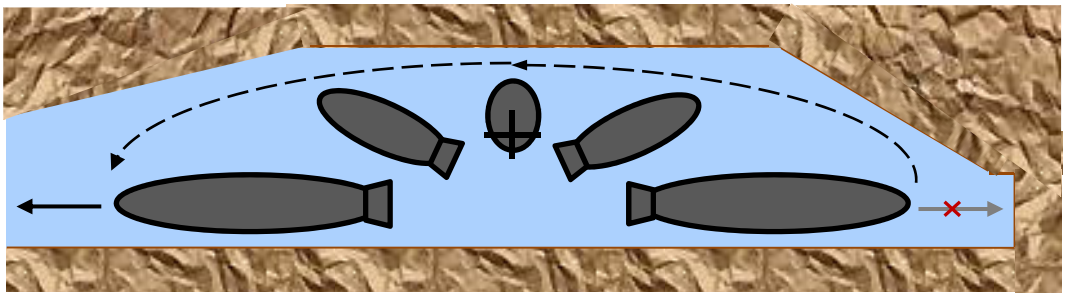


Рисунок 2 — Разрез в вертикальной плоскости стесненных условий, позволяющих АНПА развернуться только при задействовании пространства над АНПА

Обсервация в ледовой обстановке

При использовании АНПА для обследования дна и его толщи с целью поиска полезных ископаемых или антропогенных объектов его оснащают разнородными СТЗ, расположенными в подкильной области АНПА. Из-за накапливаемой погрешности бортовой инерциальной навигационной системы (БИНС), предназначенной для определения собственного положения АНПА, необходимо проведение периодической обсервации по сигналам спутниковых навигационных систем (СНС) с целью уточнения координат своего местоположения и обеспечения собственной навигационной безопасности (рис. 3). Обсервация АНПА по сигналам СНС в ледовой обстановке возможна только либо путем «приледнения» специальной антенной к нижней кромке льда, либо всплытием в полынье [6].

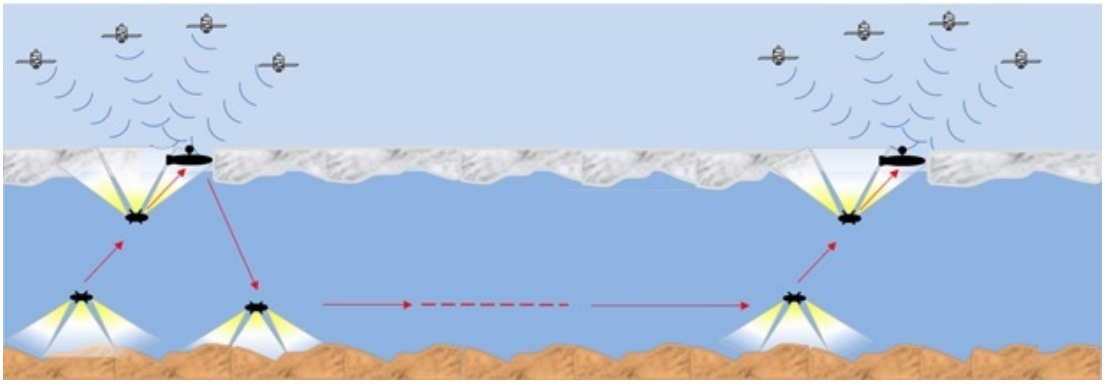


Рисунок 3 — Положение АНПА в стесненных условиях

Из-за постоянного дрейфа льда прогнозировать заранее положение подходящей площадки для приледнения антенны или полыньи невозможно, в связи с чем для обсервации необходимо проведения поиска подходящей по размерам площадки или полыньи. В настоящее время единичные публикации по поиску полыньи предполагают оборудование в верхней части корпуса АНПА однолучевым или многолучевым эхолотом, профилографом [6], в результате чего для оценки размера полыньи и определения точки всплытия АНПА требуется маневрирование АНПА несколькими галсами вдоль и поперек обнаруженной полыньи. Это приводит к существенным временным и энергетическим затратам.

Для сокращения времени обнаружения площадки для приледнения антенны или полыньи предлагается перевести зоны обзора СТЗ из нижней полусферы в верхнюю путем маневрирования АНПА по крену. С ис-

пользованием МЛЭ, ГБО, оптических средств, ПФ, тепловизора появляется возможность повысить площадную производительность обследования нижней ледовой поверхности за счет увеличения ширины обследуемой полосы от 160 м до 800 м по сравнению с традиционно используемым эхолотом, а также – оценить изменения параметров льда (толщины, структуры) и течения и прогнозировать место появления полыньи. Оптические средства (видеокамера, тепловизор) способны выявить полынью путем распознавания образов на видеоизображении: яркого пятна на более темном фоне пакового льда. Кроме того, возможно использование тепловизора для обнаружения полыньи по разнице температур воды в полынье и льда. ПФ по излучению/приему низкочастотных акустических сигналов позволяет оценить толщину и структуру льда (сплоченный/рыхлый) для определения возможности безопасного пробития его корпусом АНПА без повреждений корпуса и выступающих за пределы корпуса забортных приборов и исполнительных механизмов. В дополнение к СТЗ может быть использован доплеровский лаг, направленный вертикально вверх, для оценки скорости движения льда и учете ее при планировании точки безопасного всплытия АНПА в полынье.

Обследование толщи воды на мелководье

Обнаружение малоразмерных объектов на морской поверхности (маломерных судов, льдин, мусорных островов, малоразмерных плавательных средств, серфинговых досок-разведчиков, очагов загрязнений нефтепродуктами, обломков после аварий судов или самолетов, пловцов-нарушителей и т.п.) [7]) затруднено разделом двух сред вода-воздух, волнением и влиянием внешних условий (дождь, туман). Обнаружение малоразмерных объектов из верней полусферы возможно оптическими и радиолокационными средствами (РЛС), из нижней – гидроакустическими и электромагнитными средствами. Однако визуальный поиск с помощью оптических средств указанных объектов из верхней полусферы затруднен погодными условиями (снег, град, дождь) и темным временем суток. Во многих случаях невозможно заранее заложить эталонные изображения всех интересующих объектов, что накладывает на систему автоматического обнаружения дополнительные ограничения [8,9]. Применение оптико-электронной системы (ОЭС) и тепловизионных систем в инфракрасном диапазоне может быть затруднено из-за невозможности отделить объект от фона. Дальность обнаружения используемых в прибрежной зоне радиолокаторов существенно зависит от особенностей искомых объектов. Так, пловца на поверхности воды можно обнаружить камерами видеонаблюдения, тепловизорами и радиолокаторами, однако если вода недостаточно прозрачная, то дальность обнаружения **существенно сокращается.** Тепловизор может обнаружить дайвера вблизи или на поверхности воды**,** однако в теплых тропических водах обнаружение существенно затруднено. Наблюдение и отслеживание быстроходных лодок в непосредственной близости к РЛС или тепловизору способно привести к потере цели в связи с недостаточной скоростью сканирования и малым углом их обзора в 1°-3°.

Альтернативой наблюдения за морской поверхностью из верхней полусферы является использование подводных средств наблюдения, работающих с гидроакустическими сигналами. Дальность обнаружения составляет 300-600 м [10]. Современные специализированные активные гидроакустические станции обнаружения боевых пловцов проблематичным с больших дистанций из-за возникновения на мелководье поверхностной и донной реверберацией, а также неравномерность прогревания морской воды и искривление лучей. Стационарные станции устанавливают вблизи берега, однако из-за близости прибрежного дна усиливается уровень донной реверберации [11], в результате чего существенно сокращается дальность обнаружения объекта.

Недостатков прибрежных стационарных гидроакустических средств лишены автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА). Обнаружение активной локацией объектов на морской поверхности основано на разности отражения от объектов различной плотности обнаруживаемых объектов и плотности воды и воздуха. Так, использование зондирующего линейно-частотного сигнала (ЛЧМ-сигнала), излучаемого МЛЭ и ГБО, позволяет по разнице отраженного сигнала из-за разных плотностей облучаемых сред и объектов – выделить объект с большей по отношению к фону плотностью. Экспериментальные исследования программных моделей алгоритмов пространственно-временной обработки над ЛЧМ-сигналом показали возможность выделения выходного сигнала на фоне помех при отношении сигнал/помеха, равном 1 [12]. Для обследования из-под воды морской поверхности необходимо в верхней части корпуса АНПА разместить поисковое оборудование – одно- или многолучевые эхолоты.

Для обеспечения возможности АНПА одинаково эффективно вести поиск как донных объектов, так и объектов на морской поверхности одной и той же поисковой аппаратурой и СТЗ целесообразно маневрирование АНПА по крену для обзора толщи воды, дна и морской поверхности.

Таким образом, после рассмотрения трех различных моделей применения АНПА – в узкостях, при обсервации в ледовых условиях и при патрулировании водной среды, включая дно и поверхность, выявлена целесообразность в дополнение к маневрированию АНПА по курсу, дифференту и глубине – маневрированием по крену.

Рассмотрим возможность и условия, необходимые для маневрирования по крену.

Алгоритм управляемого изменения крена

Для создания системой управления [13,14] кренящего момента, независимого от формы корпуса АНПА и положения рулей, принимаем, что АНПА имеет крестообразные или Х-образные кормовые рули; корпус

АНПА представляет собой фигуру вращения вокруг продольной оси для обеспечения равномерного распределения массы корпуса и оборудования АНПА; приборы внутри корпуса АНПА размещают так, чтобы их масса была распределена равномерно в диаметральной плоскости АНПА.

Для формирования кренящего момента необходимо начать смещение груза внутри АНПА. Сделать это можно различными способами:

– перемещение груза, изначально находящегося на борту АНПА, поперек корпуса АНПА; груз можно перемещать: равномерно, с ускорением, с использованием импульса [15];

– закачивание воды в специально оборудованные на АНПА с каждого борта цистерны – по принципу глайдера, только не в продольной, а в поперечной плоскости [16];

– перемещение с борта на борт специального балласта, в роли которого может выступать аккумуляторная батарея (АБ) самого аппарата [17];

– использование специально размещенных на борту НПА эластичных емкостей и перекачка рабочей жидкости между внутренней и внешней (по отношению к прочному корпусу) емкостями;

– маневрирование АНПА по курсу, «побочным» эффектом которого является возникновение крена, для усиления которого возможно использование эффекта параметрического резонанса [18].

Один из способов с четырьмя цистернами, расположенными по корпусу (рис. 4), защищен авторами патентом [19] и может быть использован для формирования крена. Для демонстрации динамики изменения крена балластные цистерны обозначены разным цветом; полая цистерна обозначена окружностью, заполненная – кругом; положение АБ показано прямоугольником черного цвета.

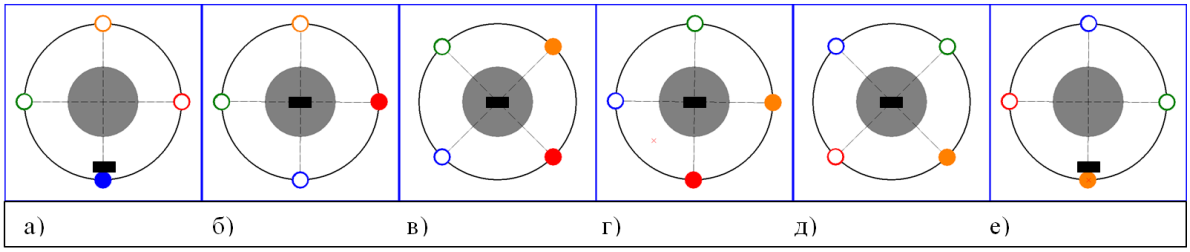


Рисунок 4 — Схема размещения балластных цистерн внутри корпуса АНПА и последовательность перекачки воды между цистернами при управляемом изменении крена

При проведении расчетов по управляемому изменению крена с использованием имитационного моделирования [21] за прототип АНПА принят «Hugin» (Норвегия) со следующими характеристиками [20]: масса 750 кг; длина 4,50 м; диаметр 0,75 м. Объем каждой балластной цистерны принимался равным 0,008 м^3. Момент инерции АНПА составил 52,7 кг·м^2, полное подводное водоизмещение составило 5,3 м^3.

По результатам моделирования получены зависимости изменения кренящего момента с течением времени, которые показали, что зависимость изменения крена от 0° до +180° близка к форме гистерезиса. Изменение кренящего момента сначала плавно возрастает, затем достигает своего максимума и после этого убывает, вследствие чего крен постепенно увеличивается от 0° до +180°, и при θ = +180° кренящий момент и угловая скорость принимают нулевые значения. Время изменения крена от 0° до +180° составило 1,5 часа.

Полученные результаты компьютерного моделирования подтверждают реализуемость и достоверность предлагаемого способа кренения АНПА.

В описанном в [6] способе обнаружения полыньи с использованием эхоледомера требуется найти три и более контакта полыньи, после чего АНПА должен выполнить несколько замеров вектора дрейфа льда, затем выполнить поисковый манёвр, цель которого — уточнение конфигурации полыньи по найденным контактам. Для обнаружения полыньи и определения ее размеров эхоледомером пришлось совершить 16 галсов; при использовании предложенных МЛЭ и ГБО ширина полосы достигает 160 м (высокочастотный ГБО) и 800 м (низкочастотный ГБО) [22], что позволяет оценить возможность всплытия АНПА за один галс, что приводит к существенному выигрышу в пройденном пути, времени и затрачиваемого энергоресруса.

Заключение

В работе рассмотрена перспективные модели применения автономного необитаемого подводного аппарата, требующие управляемого изменения крена: при маневрировании АНПА в замкнутом пространстве и стесненных условиях, при обсервации в ледовых условиях, при патрулировании прибрежной зоны с одновременным наблюдением за дном, толщей воды и морской поверхностью. Разработан алгоритм управляемого маневрирования АНПА по крену. На примере поиска полыньи в ледовых условиях для обсервации по сигналам спутниковых навигационных систем показано более, чем 10-кратное преимущество за счет управляемого изменения крена.

Литература

1. Лапота А.В., Николаев А.Б. Морские робототехнические комплексы военного и специального назначения. СПб.: ЦНИИ РТК. 2016. 48 с. – Текст: непосредственный.

2. Мартынова Л.А. Решение задачи подводного наблюдения в условиях применения интеллектуальных помех // Информационно-управляющие системы. № 1 (92). / Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (Санкт-Петербург) 2018. С. 31–41. – Текст: непосредственный.

3. Инзарцев А.В., Багницкий А.В. Алгоритмы обхода локальных донных объектов для автономного подводного робота // Материалы шестой всероссийской научно-технической конференции «Технические проблемы освоения мирового океана» (ТПОМО-6) 28 сентября-2 октября 2015 г. / ФГУП «Издательство Дальнаука». Владивосток. 2015. С.450 – 454. – Текст: непосредственный.

4. Мартынова Л.А., Розенгауз М.Б. К вопросу о надежности автономного необитаемого подводного аппарата с мультиагентной архитектурой системы управления // Информационно-управляющие системы. № 5 (84) / Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (Санкт-Петербург). 2016.С. 25–34. – Текст: непосредственный.

5. Боженов Ю.А. Использование автономных необитаемых подводных аппаратов для исследования Аркики и Антарктики// Фундаментальная и прикладная гидрофизика, том 4, № 1/ Санкт-Петербургский научный центр РАН (Санкт-Петербург), 2011,с.47-68. – Текст: непосредственный.

6. Лаптев К.З. Задача для АНПА дальнего радиуса действия по поиску полыней при плавании в Арктических районах / К.З. Лаптев, А.В. Багницкий // Известия ЮФУ. Технические науки. 2019. № 1 (203) / Южный федеральный университет (Таганрог). С. 28-38. DOI 10.23683/2311-3103-2019-1-28-38. – Текст: непосредственный.

7. Егоров В.А. Обнаружение и идентификация (распознавание) объектов искусственного и естественного происхождения на морской поверхности // Успехи современной радиоэлектроники. №2 / Издательство «Радиотехника» (Москва). 2012 . С. 69-75. – Текст: непосредственный.

8. Тупиков В.А., Павлова В.А., Бондаренко В. А., Александров В. А. Способ автоматического обнаружения объектов на морской поверхности в видимом диапазоне // Известия ТулГУ. Технические науки / Тульский государственный университет (Тула) Вып. 11. Ч. 3. 2016. с. 105-121. – Текст: непосредственный.

9. Мартынова Л.А., Koryakin A.V., Lantsov K.V., Lantsov V.V. Determination of coordinates and parameters of a moving object by image processing // Computer Optics. Т. 36. № 2. / Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и Фотоника» Российской академии наук (Москва). 2012. С. 266–273. – Текст: непосредственный.

10. Система обнаружения подводных пловцов. 2024. URL: https://trancons.ru/products/DDS/SOPP-K/

11. Методы и средства защиты от подводных диверсантов. 2024. URL: http://en.academic.ru/dic.nsf/enwiki/1312355.

12. Маркович И.И. Многоканальная система цифровой пространственно-временной обработки гидроакустических сигналов перспективного комплекса проведения поисково-спасательных работ / И.И. Маркович // Известия ЮФУ. Технические науки. №3 (58) / Южный федеральный университет (Таганрог). 2006. С. 174-179. – Текст: непосредственный.

13. Мартынова Л.А., Киселев Н.К., Мысливый А.А. Метод выбора архитектуры мультиагентной системы управления автономного необитаемого подводного аппарата // Информационно-управляющие системы. № 4 (107) / Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (Санкт-Петербург). 2020. С. 31–41. – Текст: непосредственный.

14. Мартынова Л.А., Машошин А.И., Пашкевич И.В., Соколов А.И. Алгоритмы, реализуемые интегрированной системой управления АНПА // Известия ЮФУ. Технические науки. / Южный федеральный университет (Таганрог). № 1 (162)2015.. С. 50–58. – Текст: непосредственный.

15. Черноусько Ф.Л., Болотник Н.Н. Динамика мобильных систем с изменяющейся конфигурацией. М.: Физматгиз. 2022. 464 с. – Текст: непосредственный.

16. Кожемякин И.В., Рождественский К.В., Рыжов В.А., Смольников А.В. Разработка автономных необитаемых подводных глайдеров // Известия ЮФУ. Технические науки. / Южный федеральный университет (Таганрог). 2013. с.31-39. – Текст: непосредственный.

17. Автономные подводные аппараты с гидродинамическими принципами движения. Электронный ресурс URL: https://dfnc.ru/predpriyatiya/avtonomnye-podvodnye-apparaty-s-gidrodinamicheskimi-printsipami-dvizheniya/ (дата обращения 06.10.2024).

18. Ершов А.А., Теренчук А.В. Практический способ определения параметрического резонанса по бортовой качке судна // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. № 5 (33). / ФГБОУ ВО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова» 2015. С. 18–25. – Текст: непосредственный.

19. Патент № 2 823 820 Российская Федерация МПК B63G 8/22 (2006.01). Способ управляемого изменения крена автономного необитаемого подводного аппарата. № 2024107703: заявл., 25.03.2024 : опубликовано

30.07.2024 / Мартынова Л.А., Пашкевич И.В ; заявитель Акционерное общество «Концерн «Центральный научно-исследовательский институт «Электроприбор». - 11 с. : ил. - Текст: непосредственный.

20. HIS Jane's Unmanned Maritime Vehicles 2019-2020. Hugin. Publisher, JANE'S INFORMATION Group. London. – P.14.

21. Мартынова Л.А., Гриненков А.В., Пронин А.О., Куликовских Ю.В. Имитационное моделирование функционирования мультиагентной системы управления автономного необитаемого подводного аппарата // В сборнике: Имитационное моделирование. Теория и практика. Восьмая Всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности. / Санкт –Петербург.: НП «НОИМ». 2017. С. 474–479. – Текст: непосредственный.

22. Подводные технологии и средства освоения Мирового океана. – М.: Издательский дом «Оружие и технологии». – 2011. – 780с. – Текст: непосредственный.

Информация об авторах

Мартынова Любовь Александровна, с.н.с., д.т.н., в.н.с., Государственный научный центр Российской Федерации Акционерное общество «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» (АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»), Россия, 97046, Санкт-Петербург, ул. Малая Посадская, д. 30, martynowa999@bk.ru, ORCID: 0000-0002-5613-0838

Пашкевич Иван Владимирович, гл. специалист по направлению, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Россия, 97046, Санкт-Петербург, ул. Малая Посадская, д. 30, iv999@bk.ru, ORCID: 0000-0002-6706-5592

Перспективы развития морских робототехнических комплексов с учётом группового применения

А.С. Проценюк✉, И.Б. Калинин
Государственный научный центр Российской Федерации «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики» (ГНЦ РФ ЦНИИ РТК), Санкт-Петербург, Россия, a.procenyuk@rtc.ru

Аннотация
В статье отражены тенденции, области применения и основные задачи, стоящие перед морскими робототехническими средствами. Необходимость и целесообразность применения роботов в составе групп. Рассмотрены стратегии группового управления.

Ключевые слова
Морских робототехнических средств (МРТС), морские робототехнические комплексы (МРТК), система группового управления, стратегии группового управления.

Благодарности
Результаты получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России FNRG-2022-0008 № 075-01623-22-01 «Исследование и разработка алгоритмов группового управления автономными необитаемыми подводными аппаратами в условиях ограниченной пропускной способности гидроакустических каналов связи».

Prospects for the development of marine robotic complexes taking into account group applications

Aleksey S. Procenyuk✉, Ilya B. Kalinin
Russian state scientific center for robotics and technical cybernetics, St. Petersburg, Russia, a.procenyuk@rtc.ru

Annotation
The article reflects the trends, areas of application and the main tasks facing marine robotics. The necessity and expediency of using robots in groups. The strategies of group management are considered.

Key words
Marine robotic systems (MRTS), marine robotic complexes (MRTC), group management system, group management strategies.

Acknowledgements
The results were obtained as part of the fulfillment of the state task of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation FNRG-2022-0008 No. 075-01623-22-01 «Research and development of algorithms for group control of autonomous uninhabited underwater vehicles in conditions of limited capacity of hydroacoustic communication channels».

Роботы, как свидетельствует опыт их создания и применения, внедряются в первую очередь там, где труд человека и его жизнедеятельность затруднены, невозможны или сопряжены с угрозой для жизни и здоровья. Например, это имеет место в зонах радиоактивного или химического загрязнения, в условиях боевых действий, при проведении подводных или космических исследований, работ и т.п.

Важнейшим направлением развития мировой цивилизации в третьем тысячелетии стало освоение ресурсов Мирового океана. Для России океанский шельф интересен не только с точки зрения освоения природных ресурсов Мирового океана, но и в плане обеспечения национальной безопасности страны.

Общемировыми тенденциями в области морской робототехники являются:

1. Значительное увеличение количества морских робототехнических средств (МРТС).
2. Рост числа морских операций, проводимых с применением МРТС.
3. Увеличение автономности средств.
4. Развитие средств автоматизации, в том числе за счет искусственного интеллекта.
5. Комплексное коллективное согласованное применение МРТС.

Наиболее перспективными областями применения МРТК гражданского назначения, являются задачи, связанные с обследованием акваторий в целях:

1. Проектно-изыскательских работ при укладке трубопроводов или освоении подводных месторождений.

2. Геологоразведка.
3. Очистка дна от потенциально опасных объектов.
4. Обследование трассы подводных трубопроводов.
5. Обеспечение безопасности акваторий морских и прибрежных объектов.
5. Экологический мониторинг.
6. Ликвидация последствий аварийных ситуаций (аварийно-восстановительные работы).

Основными задачам морских робототехнических комплексов (МРТК) военного назначения являются:
1. Решение ударных задач.
2. Противоминные действия.
3. Ведение разведки.
4. Охрана объектов.
5. Осуществление снабжения.

С точки зрения тактики наиболее эффективно могут применяться группы разнородных робототехнических средств, состоящих из воздушных, надводных и подводных комплексов. Имея в своём составе разведывательные и ударные робототехнические средства. Сама угроза внезапного нападения с применением роботов-камикадзе или роботов носителей ударных вооружений, которые возможно обнаружить только на малых дальностях, способна вымотать любого противника. Гибридная группа роботов, действующих по общему замыслу, под управлением единого алгоритма, в состоянии нанести существенный ущерб противнику.

Преимущества группового применения роботов, действующих по гибкому алгоритму в сложной, неструктурированной среде с изменяющимися параметрами также очевидны. В общем случае, это:

– больший радиус действия, достигаемый за счет рассредоточения роботов по всей рабочей зоне;
– расширенный набор выполняемых функций, достигаемый за счет установки на каждого робота индивидуальных исполнительных устройств;
– уменьшение времени выполнения операций, экономия ресурсов отдельного робота за счет оптимального планирования ресурсов группы;
– более высокая вероятность выполнения задания, достигаемая за счет возможности перераспределения целей между роботами группы.

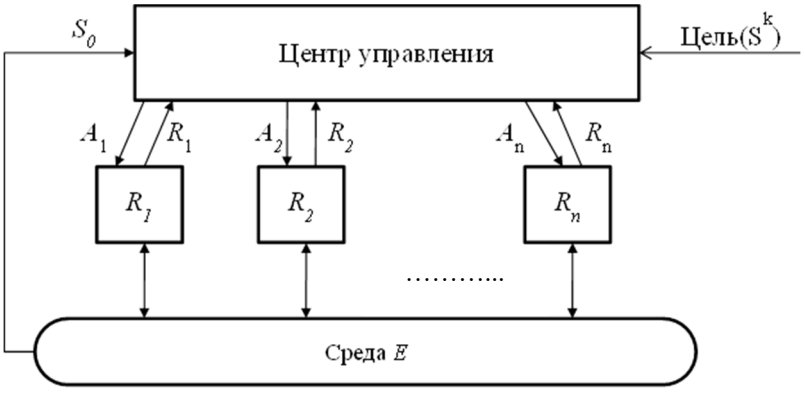
Коротко перечислим области применения морских автономных роботов:

– выполнение операций гидрографической съёмки морского дна, использование роботов при этом осложняется ограниченной пропускной способностью гидроакустического канала связи;
– ликвидация последствий техногенных аварий и связанных с ними загрязнений окружающей среды;
– выполнение поисково-спасательных операций на море;
– выполнение производственных операций в удаленных, малодоступных и недоступных зонах.

Управление группой роботов осуществляется системой группового управления, в которой могут реализовываться различный стратегии управления, основные из которых мы рассмотрим.

Централизованная единоначальная стратегия группового управления

Централизованная единоначальная стратегия группового управления представлена на рисунке 1.



1 — Централизованная единоначальная стратегия группового управления

Преимущества централизованной единоначальной стратегии группового управления:

– простота организации и соответственно алгоритмизации процедур группового управления;
– высокое качество решения задачи группового управления, достигаемое за счет значительных вычислительных ресурсов центрального узла управления.

Недостатки централизованной единоначальной стратегии группового управления:

– низкая живучесть системы;
– длительное время решений задачи группового управления.

Централизованная иерархическая стратегия группового управления

Централизованная иерархическая стратегия группового управления приведена на рисунке 2.

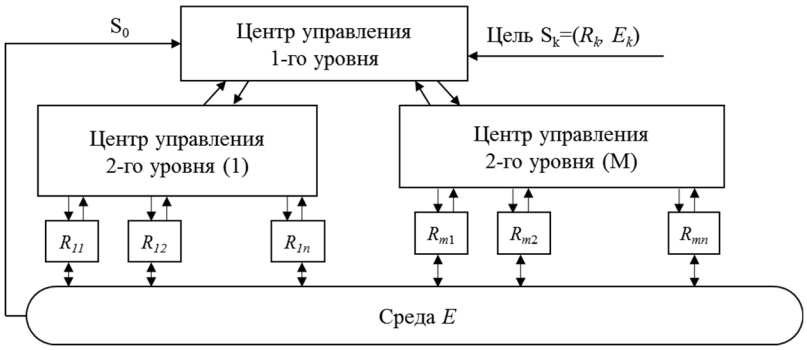


Рисунок 2 — Централизованная иерархическая стратегия группового управления

Преимущества централизованной иерархической стратегии группового управления:

– снижение времени решения задачи группового управления;

– возможность управления большим числом объектов;

– более высокая живучесть по сравнению с централизованной единоначальной стратегией группового управления.

Недостатки централизованной иерархической стратегии группового управления:

– большая временная задержка и возможность искажений при передаче команд управления от верхнего уровня к нижнему по сравнению с централизованной единоначальной стратегией группового управления;

– снижение качества решения задачи группового управления по сравнению с полностью централизованной стратегией.

Децентрализованная коллективная стратегия группового управления

Децентрализованная коллективная стратегия группового управления приведена на рисунке 3.

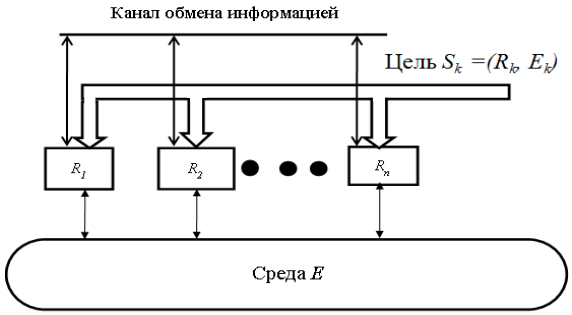


Рисунок 1 — Децентрализованная коллективная стратегия группового управления

Децентрализованная коллективная стратегия группового управления реализует следующие принципы управления:

1. Каждый объект *Ri (i =1,n)* имеет полную модель взаимодействия со всеми другими членами группы и средой, а также информационный канал связи со всеми другими членами группы.

2. На основании модели объект R_i выбирает такое действие A_i^T, которое направлено на преобразование текущей ситуации *So* в целевую *Sk* и дает при этом экстремальное приращение функционалу *Y* при фиксированных действиях и состояниях других членов группы и среды.

3. Если ни одно из возможных действий объекта *Ri* не дает приращения функционалу *Y*, то объект переходит к исполнению ранее выбранного действия A_i^T .

В противном случае информация о новом выбранном действии A_i^T объекта *Ri (i =1,n)* сообщается всем остальным членам группы, после чего объект переходит к п. 2.

Преимущества децентрализованной коллективной стратегии группового управления:

– малое время принятия решения задачи группового управления по сравнению с централизованными стратегиями;

– повышенная живучесть по сравнению с централизованными стратегиями.

Недостатки:

– невысокое качество решения задачи группового управления в отсутствие централизованного решения задач оптимизации;

– требование формализованной и полной модели взаимодействия («правил игры») со средой и другими членами группы;
– высокие требования к надежности информационного канала связи.

Децентрализованная роевая стратегия группового управления

Структура децентрализованной роевой стратегии группового управления представлена на рисунке 4.

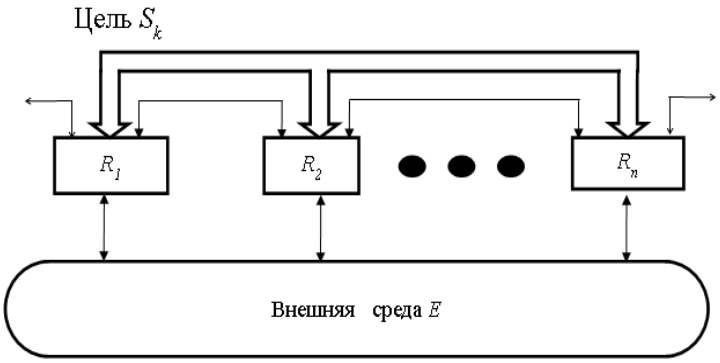


Рисунок 4 — Децентрализованная роевая стратегия группового управления

Децентрализованная роевая стратегия группового управления реализует следующие принципы управления:

1. Каждый объект *Ri* обладает как моделью взаимодействия с ограниченным подмножеством объектов $Rbi \le R$ и средой, так и информационным каналом связи с ограниченным подмножеством объектов $Rbi \le R$.
2. На основании модели объект *Ri* выбирает такое свое действие, которое при фиксированных действиях других объектов подмножества $Rbi \le R$ направлено на достижение целевой ситуации *Sk* и дает экстремальное приращение функционалу *Y*.
3. Осуществляется итерационная оптимизация групповых действий в подмножестве *Rbi* до тех пор, пока никакие новые действия объектов *Ri* не дают приращения функционалу *Y*.

Преимущества децентрализованной роевой стратегии группового управления:
– высокая живучесть;
– малое время принятия решения задачи группового управления;
– возможность управления массово-применяемыми объектами.

Недостатки децентрализованной роевой стратегии группового управления:
– невысокое качество решения группового управления из-за отсутствия глобальной оптимизации;
– относительно невысокая скорость реакции на внешние объекты (особенно на динамические).

Децентрализованная стайная стратегия группового управления

Децентрализованная стайная стратегия группового управления представлена на рисунке Рисунок5.

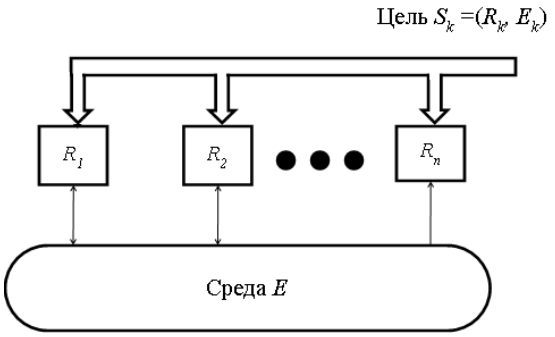


Рисунок 5 — Децентрализованная стайная стратегия группового управления

Децентрализованная стайная стратегия группового управления реализует следующие принципы управления:

1. Каждый объект *Ri* имеет свою индивидуальную модель взаимодействия со средой *Ri Ei* причем какая-либо прямая информационная связь между объектом *Ri* и другими объектами множества *R* отсутствует.

2. На основании модели объект *Ri* выбирает такое свое действие A_i^T, которое при фиксированных действиях других объектов подмножества направлено на достижение целевой ситуации *Sk* и дает экстремальное приращение функционалу *Y*.

3. После выполнения действий A_i^T объект *Ri* сравнивает ожидаемую, согласно модели, ситуацию в среде $S_{ож}$ с реальной ситуацией $S_р$ и на основании разницы между ними осуществляет коррекцию модели.

Преимущества децентрализованной стайной стратегия группового управления:

- малое время принятия решения задачи группового управления,
- максимальная живучесть.

Недостатки децентрализованной стайной стратегия группового управления:

- низкое качество решения групповой задачи;
- длительное время адаптации к изменениям, происходящим в группе.

Заключение

Проанализировав различный стратегии группового управления, мы видим, что ни одна из них не соответствует в полной мере задачам, выполняемым морскими робототехническими комплексами по следующим причинам:

- для решаемой задачи критичными являются противоречивые требования: высокое качество управления при выполнении сложных функций (выше при большей централизации) в сочетании с высокой живучестью системы (выше при увеличении степени децентрализации);
- применению компромиссной децентрализованной коллективной стратегии мешает отсутствие чётко сформулированных «правил игры», то есть хорошо формализованной модели обстановки и хорошо известных участникам правил реагирования на изменения обстановки;
- трудно сформировать генеральную модель среды, локальные представления которой играют определяющую роль в формировании децентрализованных алгоритмов управления;
- при выполнении сценариев поиска/разведки невозможно обеспечить надежную локальную связь между роботами, также возможны большие задержки при попытках человека - супервизора вмешаться в опасное развитие ситуации.

Выходом из этих противоречий является создание централизованной иерархической структуры, но путем создания интеллектуальной системы поддержки принятия решений (ИСППР) на уровне центра (центров) управления. При этом группа или любая её подгруппа будет представлять собой мультиагентную систему, а каждый робот будет являться интеллектуальным агентом, способным воспринимать состояние окружающей среды, вырабатывать решение и взаимодействовать с другими агентами.

Информация об авторах

Проценюк Алексей Сергеевич, к.т.н., заместитель главного конструктора по морской робототехнике, Государственный научный центр Российской Федерации «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики» (ГНЦ РФ ЦНИИ РТК), Россия, 194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 21, a.procenyuk@rtc.ru

Калинин Илья Борисович, ведущий инженер-конструктор, ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Россия, 194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 21, i.kalinin@rtc.ru

Надводный автономный дрон для информационно-навигационного обеспечения водолаза

А.А. Тузова✉, А.Г. Кузнецов, А.М. Назаров, С.С. Гойман, И.В. Кожемякин
Санкт-Петербургский Государственный Морской Технический Университет, Санкт-Петербург, Россия, tuzova.smtu@yandex.ru

Аннотация
В статье рассмотрен проект надводного автономного дрона для информационно-навигационного обеспечения водолаза, разработанный Санкт-Петербургским государственным морским техническим университетом. Дрон предназначен для автоматического следования за водолазом, определения его местоположения под водой и поддержки надежной связи с наземной станцией. В работе описаны конструкция дрона и его функциональные возможности: сопровождение водолаза, GSM-телефония и трекинг. Также подробно рассматривается алгоритм автопилотирования и позиционирования, использующий систему с ультракороткой базой (УКБ) для получения угла на цель и дальности до цели, расширенный фильтр Калмана для оценки скорости движения дрона и три ПИД-регулятора для контроля курса и скорости дрона. Результаты математического моделирования подтверждают эффективность предложенных решений, демонстрируя точное следование дрона за водолазом в реальном времени.

Ключевые слова
Надводный морской дрон, гидроакустическая система позиционирования, гидроакустический модем, сопровождение водолаза, навигационно-информационное обеспечение водолаза, система позиционирования с ультракороткой базой, автопилотирование.

Благодарности
Работа выполнена в рамках программы стратегического развития «Приоритет-2030».

Autonomous surface drone for information and navigation support of a diver

Anna A. Tuzova✉, Andrei G. Kuznetsov, Andrei M. Nazarov, Sergei S. Goyman, Igor V. Kozhemyakin
State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia, tuzova.smtu@yandex.ru

Abstract
The article discusses a project for a surface autonomous drone designed for informational and navigational support of a diver. This project developed by Saint Petersburg State Marine Technical University. The drone is intended for automatic tracking of a diver, determining their location, and maintaining reliable communication with the ground station. The paper describes the drone's design and its functional capabilities, that includes diver accompaniment, GSM telephony, and tracking. It also details the autopilot and positioning algorithm, which uses an ultra-short baseline (USBL) system to obtain the bearing and range to the target, an extended Kalman filter to estimate the drone's velocity, and three PID controllers to control the drone's heading and speed. The results of mathematical modeling confirm the effectiveness of the proposed solutions and demonstrates precise real-time tracking of the diver by the drone.

Key words
Surface marine drone, hydroacoustic positioning system, hydroacoustic modem, diver tracking, diver navigation and information support, ultra-short base positioning system, autopilot.

Acknowledgements
The work was carried out within the framework of the strategic development program «Priority-2030».

Введение

Робототехнические системы [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**] с каждым годом становятся все более востребованными в различных сферах человеческой деятельности, в том числе такие системы активно используются при подводных исследованиях и работах [2], которые могут быть выполнены водолазами. Работа человека под водой – это сложная и опасная задача, для успешного выполнения которой необходимо оснастить водолаза и ближайшее окружение надежными и эффективными системами для обеспечения непрерывной связи с поверхностью и определения текущего местоположения водолаза.

Чтобы облегчить работу водолаза, сократить количество оборудования и при этом не потерять такие важные опции, как связь и позиционирование, можно предложить использование надводной робототехнической беспилотной системы автоматического следования за водолазом или, упрощенно, надводного дрона. Такое устройство способно совместить в себе все необходимые функции для успешного выполнения водолазной

операции, а именно: дрон будет непрерывно следовать за водолазом, что позволит отслеживать его местоположение и, как следствие, существенно снизит риск потери водолаза, также дрон будет обеспечивать надежную связь между водолазом и наземной базой, поддерживая стабильный канал передачи данных, что позволит водолазу эффективно взаимодействовать с операторами на поверхности, получать и передавать важные данные, а также реагировать на изменяющиеся условия в реальном времени.

После проведения анализа существующей литературы, научных статей и рынка морской робототехники было выявлено не так много проектов, удовлетворяющих всем требованиям, описанным выше (автоматическое следование, позиционирование, связь). Например, в работах [3-**Ошибка! Источник ссылки не найден.**] Загребского университета представлен надводный дрон, наиболее близко подходящий по заявленным требованиям. Разработанный авторами статей дрон автоматически следует за водолазом, определяя его местоположение с помощью гидроакустической (ГА) системы позиционирования с ультракороткой базой (УКБ) [6, 7], при этом за счет наличия ГНСС приемника на дроне можно получить абсолютные географические координаты водолаза. Также дрон поддерживает ГА связь с водолазом и Wi-Fi соединение с оператором на суше, что позволяет передавать полезную информацию в обе стороны.

В работе [8] представлен автономный надводный аппарат, выполняющий позиционирование автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА). В работе указано, что для позиционирования используется акустический локатор DRI-267 фирмы Benthos [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**].

А в статье [9] представлена система из трех беспилотных аппаратов – летательного, надводного и подводного. Каждый дрон выполняет свои функции: летательный оценивает окружающую надводную обстановку с помощью машинного зрения, подводный дрон следует за водолазом и передает ему необходимые данные об окружающей обстановке, а надводный выполняет функцию коммуникатора между летательным и подводным дроном.

Из российских проектов можно выделить работу [11], в которой представлен подводный дрон, выполняющий функцию сопровождения водолаза. Дрон наводится на водолаза с помощью акустического локатора и позволяет перевозить на себе оборудование, необходимое для работы. По окончании работ дрон всплывает, сигнализируя о местоположении водолаза.

Как можно видеть из анализа литературы, проектирование и создание надводного дрона, подходящего по всем требованиям для обеспечения эффективных водолазных работ, на данный момент ведется всего несколькими группами разработчиков, хотя польза и необходимость такого устройства очевидна. Таким образом, целью данной работы является представление проекта по разработке надводного автономного дрона для информационно-навигационного обеспечения водолаза.

Надводный дрон информационно-навигационного обеспечения водолаза

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет ведет разработку надводного дрона, с помощью которого будет возможно облегчить выполнение задач, поставленных перед водолазами.

На рисунке 1 представлена схема функциональной работы дрона. На рисунке 2 представлен внешний вид макетного образца дрона.

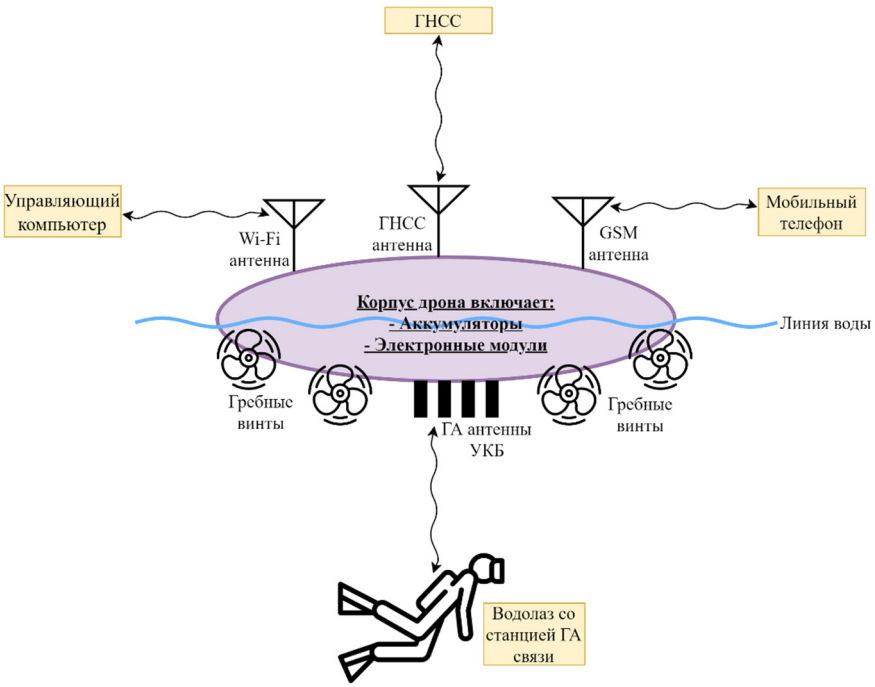


Рисунок 1 — Схема работы дрона

Рисунок 2 — Макетный образец дрона в собранном виде

Надводный дрон информационно-навигационного обеспечения водолаза представляет из себя автономный надводный аппарат, состоящий из двух основных частей: герметичного корпуса, в котором располагаются все электронные модули и аккумуляторы, и УКБ на выдвижной штанге для регулирования глубины ГА антенн (см. рис. 2).

Дрон оснащен следующими компонентами: ГНСС приемниками для определения собственных координат и курса, четырьмя гребными винтами для обеспечения трех степеней свободы перемещения, GSM антенной для возможности совершать телефонные звонки, Wi-Fi антенной для контроля движения и управления дроном с компьютера или телефона, ГА электронным модулем обработки сигналов, электронным радио-модулем, сетевым модулем, инерциальной системой навигации и т.д.

Основные функции, выполняемые дроном, включают в себя:

1. Сопровождение – автоматическое определение положения водолаза с помощью ГА системы позиционирования с УКБ и следование за водолазом по поверхности воды;
2. GSM телефон – двухсторонняя звуковая подводная связь с водолазом;
3. Трекинг – сохранение координат перемещения водолаза и передача информации о местоположении по Wi-Fi на базовую станцию.

Текущие характеристики макетного образца:

1. Размеры: длина 670 мм, ширина 370 мм, высота 320 мм (без учета опускной штанги);
2. Грузоподъемность: 1-3 кг;
3. Дальность ГА связи: до 1000 м;
4. Скорость хода: до 5 км/ч при балльности волнения моря 0-2.

Сопровождение водолаза

Одной из самых важных функций в работе дрона является сопровождение водолаза, т.е. постоянное нахождение в ближней зоне на поверхности воды над водолазом. Рассмотрим процесс сопровождения и алгоритмы автопилотирования дрона. На рисунке 3 представлена схема, содержащая блоки, выполняющие основные функции процесса сопровождения водолаза надводным дроном.

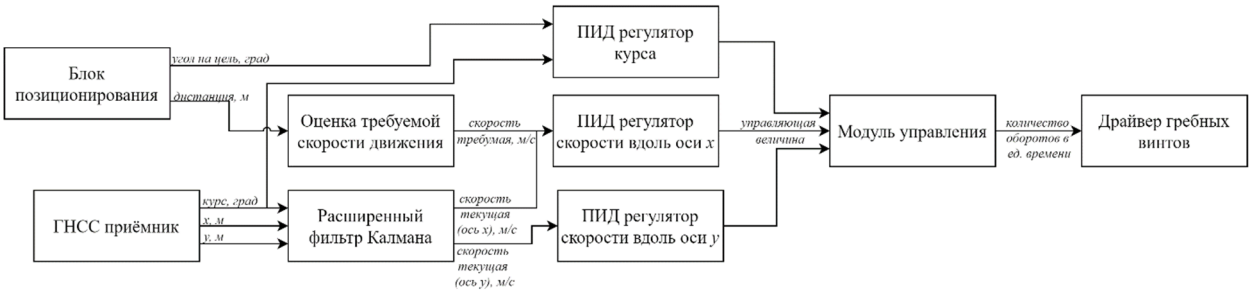


Рисунок 3 — Блок-схема алгоритма сопровождения водолаза

Как можно видеть из рисунка 3, алгоритм следования за водолазом включает в себя несколько основных блоков. Далее рассмотрим их подробнее.

Блок позиционирования

Блок позиционирования позволяет получить значения дистанции до цели и угла на цель (пеленг). Блок-схема алгоритма позиционирования, реализованного в надводном дроне представлена на рисунке 4.

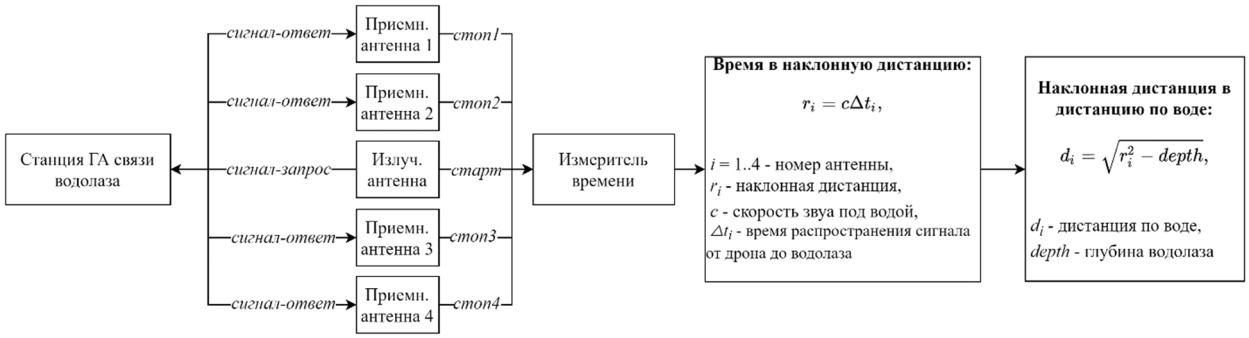


Рисунок 4 — Блок-схема алгоритма позиционирования водолаза

Как можно видеть из рисунке 4, алгоритм позиционирования строится по следующему принципу. Вначале с ГА антенны дрона отправляется короткий сигнал-запрос, при этом одновременно с излучением сигнала-запроса также запускается отсчет времени на четырех приемных каналах. На стороне водолаза ГА станция связи принимает сигнал-запрос, обрабатывает его и излучает сигнал-ответ, содержащий также информацию о текущей глубине водолаза. Четыре приемных антенны дрона принимают сигнал-ответ в разные моменты времени, что фиксируется ранее запущенными счетчиками. В итоге получается четыре временных интервала, соответствующих времени распространения сигнала от дрона до водолаза и обратно. Время переводится в наклонную дистанцию с использованием знания о скорости звука и далее, зная глубину водолаза, по теореме Пифагора рассчитываются дистанции от четырех приемных антенн УКБ дрона до водолаза в двумерной плоскости. Итоговая схема взаимного расположения УКБ дрона и водолаза в двумерной плоскости представлена на рисунке 5.

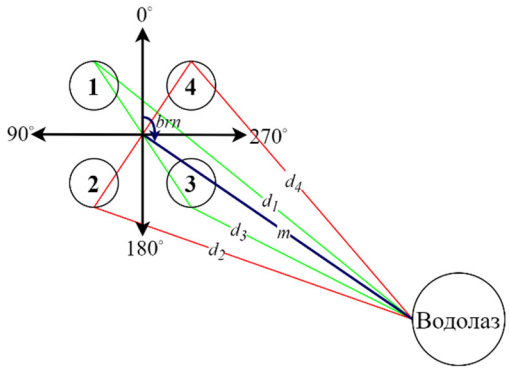


Рисунок 5 — Схема расчета угла на цель

Далее, зная дистанции до всех антенн, несложными математическими вычислениями из двух треугольников (красный и зеленый на рис. 5) рассчитывается угол на водолаза относительно центра УКБ (угол *brn* на рис. 5). В итоге на выходе блока получаем дистанцию (наклонную и по воде) до водолаза и угол на водолаза.

ГНСС приемник

Для определения координат дрона, его курса и последующего контроля скорости движения и направления движения используется ГНСС приемник. Чтоб определить курс судна, используется две ГНСС антенны, которые устанавливаются на корпусе дрона. Полученные данные с приемника передаются далее в блок фильтра Калмана и в блок автопилота для удержания курса на водолаза.

Расширенный фильтр Калмана

Для оценки скорости движения дрона используется известный алгоритм расширенного фильтра Калмана (Extended Kalman Filter – EKF) [12]. В данной задаче измеряемыми величинами являются координаты дрона и его курс, а неизвестными – продольная и поперечная скорости вдоль осей x и y. Соответственно, вектор состояния системы описывается следующим образом: x = [x, y, θ, u, v], где x, y – координаты дрона, θ – курс дрона, u, v – продольная и поперечная скорости вдоль осей x и y соответственно, а вектор измерений – z = [хизм., уизм., θизм.].

Матрица перехода состояний в данной реализации алгоритма получена из кинематических уравнений, описывающих связь между скоростями и изменением положения и ориентации, и выглядит следующим образом:

$$\boldsymbol{F} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\Delta t(u\sin\theta + v\cos\theta) & \Delta t\cos\theta & -\Delta t\sin\theta \\ 0 & 1 & \Delta t(u\cos\theta - v\sin\theta) & \Delta t\sin\theta & \Delta t\cos\theta \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

где Δt – шаг по времени.

Матрица измерений в данном случае напрямую связывает состояние системы с измеряемыми параметрами и выглядит следующим образом:

$$\boldsymbol{H} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Матрица ковариации процесса и матрица ковариации измерений представляют из себя две диагональные матрицы $\boldsymbol{Q} = \mathrm{diag}([\sigma^2_x, \sigma^2_y, \sigma^2_\theta, \sigma^2_u, \sigma^2_v])$ и $\boldsymbol{R} = \mathrm{diag}([\sigma^2_{x\,изм.}, \sigma^2_{y\,изм.}, \sigma^2_{\theta\,изм.}])$ соответственно. Матрица ковариации процесса включает в себя значения дисперсий, связанных с неопределенностями соответствующих переменных состояния, а матрица ковариации измерений – значения дисперсий шума измерений.

ПИД-регуляторы

В алгоритме управления дроном для следования за водолазом используется три ПИД-регулятора [13]: курса [14], продольной и поперечной скоростей. ПИД-регулятор удержания курса на вход принимает значение угла на цель (требуемый угол) и текущий курс дрона, управляющий сигнал на выходе ПИД-регулятора позволяет наводиться на водолаза и совершать движение в его сторону. ПИД-регулятор скоростей поддерживает требуемую скорость в зависимости от дальности водолаза: чем ближе водолаз, тем медленнее дрон движется. Таким образом, три управляющих сигнала, отображающих уровень силы, прикладываемой к гребным винтам, передаются в блок управления.

Блок управления

Данный модуль необходим для преобразования матрицы управляющих сигналов с ПИД-регуляторов в требуемую скорость вращения гребных винтов [14], которая далее передается на драйверы управления винтами.

Исходя из вышеописанного, можно обозначить итоговый алгоритм автоматического управления надводным дроном для сопровождения водолаза: модуль позиционирования определяет курс на водолаза и дистанцию до него; модуль ГНСС считывает текущие координаты дрона и его ориентацию в пространстве; с помощью расширенного фильтра Калмана оценивается скорость движения дрона; далее значения угла на цель, текущего курса дрона, его текущая и требуемая скорости передаются на три ПИД-регулятора, которые обеспечивают выполнение наведения дрона на цель и движения в ее сторону с заданной скоростью с помощью модуля управления гребными винтами.

Такой алгоритм позволяет выполнить точное наведение и движение в сторону водолаза с помощью совместной работы ГА средств связи и позиционирования и ГНСС, быстро отреагировать на смену направления или скорости, а также противодействовать внешним условиям течения и волнения воды на акватории.

Оценка работы алгоритма на математической модели

Для того чтобы оценить работоспособность алгоритма перед проведением натурных испытаний, была разработана математическая модель системы, включающая в себя движущегося по заданной траектории водолаза и следующего за ним надводного дрона, производящего в процессе движения позиционирование водолаза. Математическая модель учитывает реальные размеры разработанного макета дрона, воздействие на дрон силы тяги гребных винтов, воздействие волн и течения, а также гидродинамику и гидростатику судна [14]. Все силы и моменты, воздействующие на дрон, суммируются и интегрируются для получения значений параметров, описывающих точное положение судна в пространстве. С помощью такой модели можно оценить плавучесть дрона с текущими параметрами, адекватность прокладываемой траектории, проверить отклик алгоритмов управления на различные маневры водолаза и т.д. На рисунках 6-15 представлены примеры траекторий движения дрона и водолаза, полученные с помощью математического моделирования и позволяющие оценить применимость представленного ранее алгоритма в различных условиях.

Как можно видеть из рисунков 6-15, математическое моделирование движения дрона вслед за водолазом подтверждает работоспособность алгоритма. Также можно наблюдать, что расхождение между траекториями дрона и водолаза стремится к 0 м со временем, что указывает на корректный выход дрона на цель и последующее удержание наименьшей дистанции.

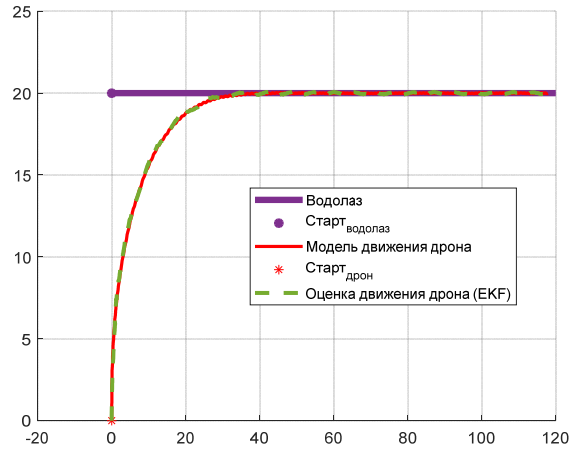


Рисунок 6 — Пример сопровождения водолаза 1

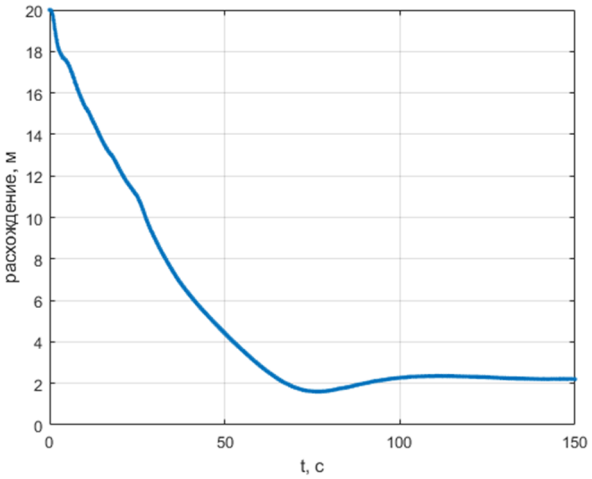


Рисунок 7 — Расхождение между траекториями 1

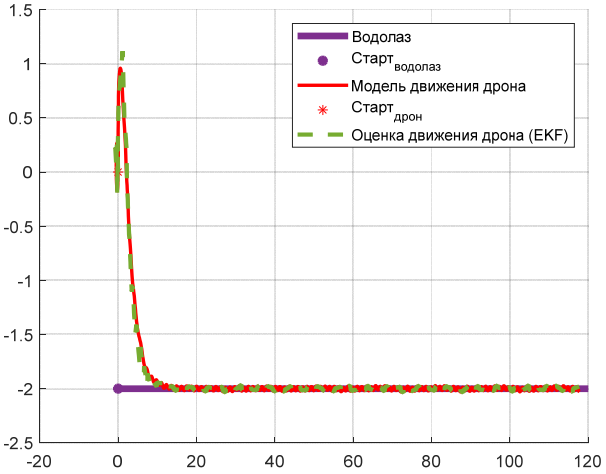


Рисунок 8 — Пример сопровождения водолаза 2

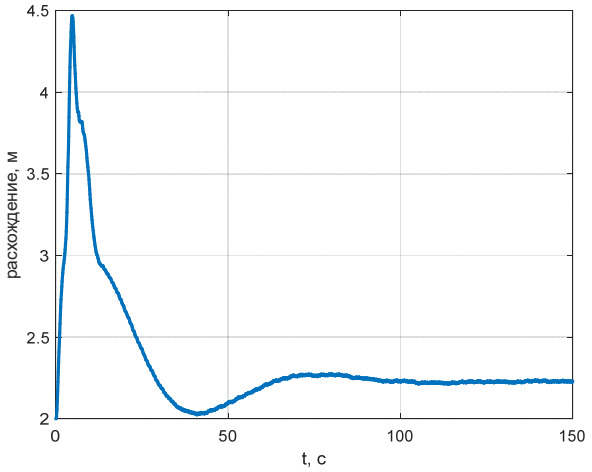


Рисунок 9 — Расхождение между траекториями 2

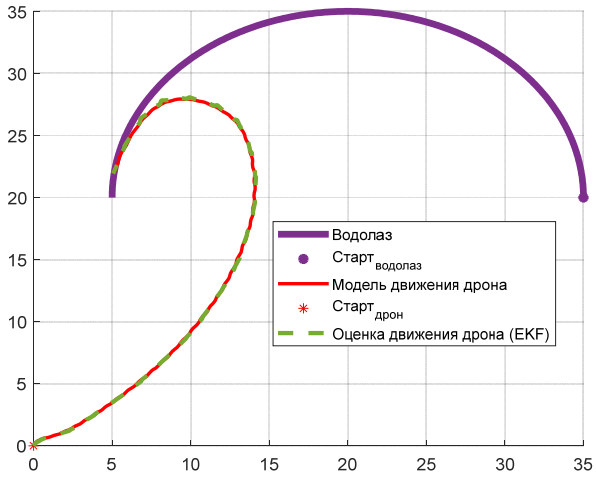


Рисунок 10 — Пример сопровождения водолаза 3

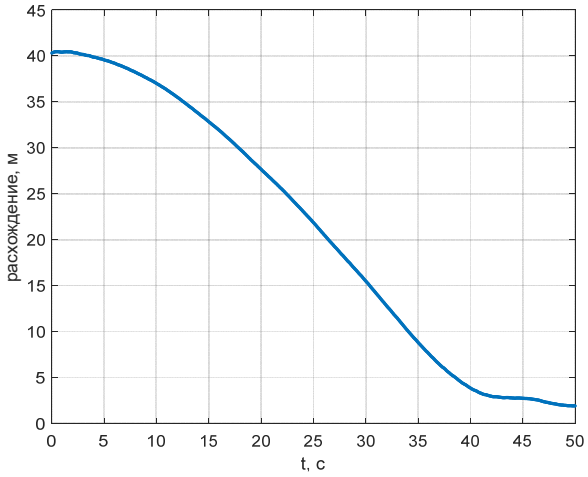


Рисунок 11 — Расхождение между траекториями 3

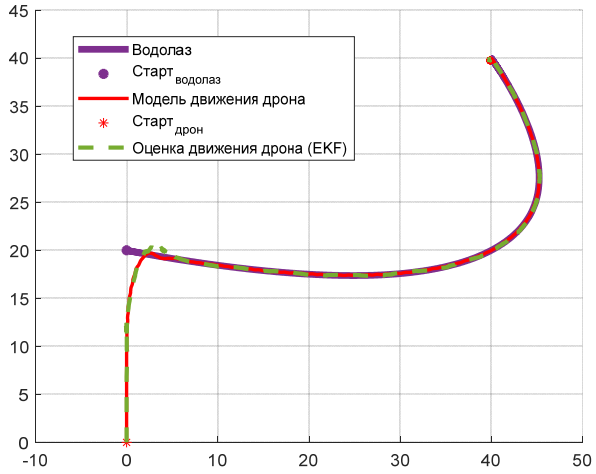


Рисунок 12 — Пример сопровождения водолаза 4

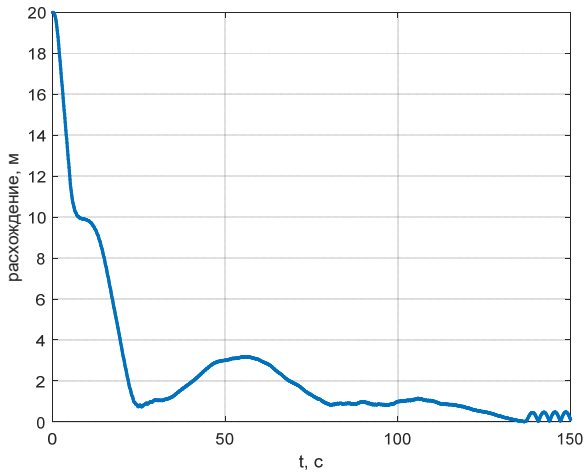


Рисунок 13 — Расхождение между траекториями 4

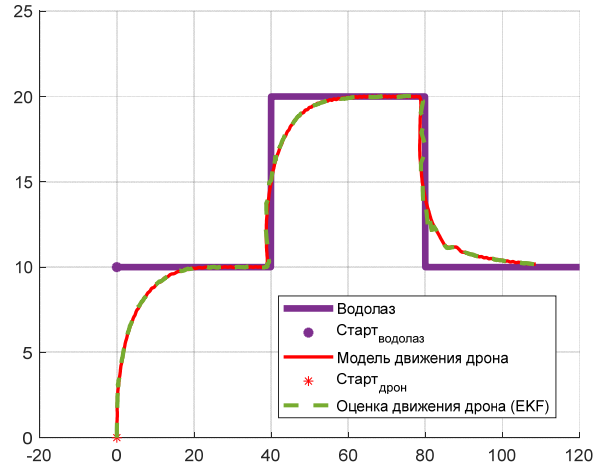


Рисунок 14 — Пример сопровождения водолаза 5

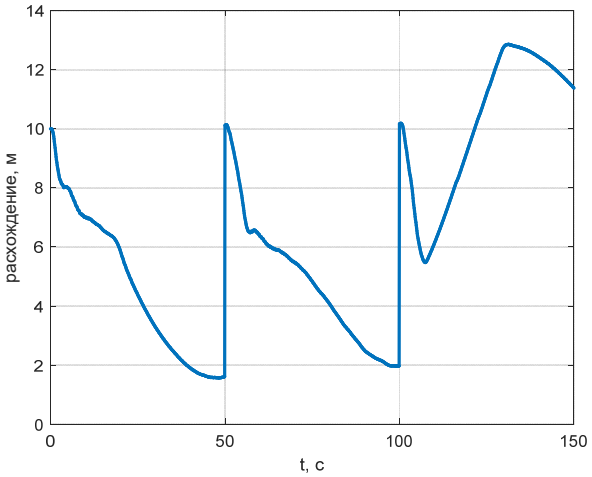


Рисунок 15 — Расхождение между траекториями 5

Заключение

В работе представлена разработка Санкт-Петербургского морского технического университета – надводный автономный дрон для информационно-навигационного обеспечения водолаза. Такое устройство обладает всеми требуемыми функциями для обеспечения непрерывного следования за водолазом и поддержки надежной связи водолаза с наземной станцией. Комплексное устройство такого типа, соединяющее в себе ГА функции позиционирования и передачи данных под водой и радиосвязь на воздухе, позволит отслеживать местоположение водолаза, что существенно снизит риск его потери, и обеспечит эффективное взаимодействие

между водолазом и операторами на поверхности, что позволит получать и передавать важные данные, а также реагировать на изменяющиеся условия в реальном времени.

Представлен макетный образец разрабатываемого дрона, размеры и вес которого удобны для ручной транспортировки, и основные функции которого включают в себя сопровождение водолаза, GSM телефонию и трекинг водолаза.

Также в статье рассматривается алгоритм, позволяющий выполнять точное следование за водолазом за счет комбинации алгоритма позиционирования системой с УКБ, расширенного фильтра Калмана для оценки скорости движения дрона и трех ПИД-регуляторов, что подтверждается путем математического моделирования. Из полученных результатов моделирования видно, что дрон всегда правильно наводится на цель и следует за ней, непрерывно сокращая расхождение по дистанции.

Дальнейшие планы по работе с надводным дроном для информационного-навигационного обеспечения водолаза включают в себя проверку дрона на натурных испытаниях, улучшение плавательных характеристик, отработку различных маневров и т.д.

Литература

1. Springer Handbook of Robotics / ed. B. Siciliano, O. Khatib. – Springer, 2008.
2. Liu Z., Zhang Y., Yu X., Yuan C. Unmanned surface vehicles: An overview of developments and challenges // Annual Reviews in Control. – 2016. – Vol. 41. – P. 1-13. – DOI: 10.1016/j.arcontrol.2016.04.018.
3. Mišković N., Nad D., Vasilijević A., Vukić Z. Dynamic positioning of a diver tracking surface platform // IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline). – 2014. – Vol. 19. – P. 4228-4233.
4. Nađ Đ., Mandić F., Mišković N. Using Autonomous Underwater Vehicles for Diver Tracking and Navigation Aiding // Journal of Marine Science and Engineering. – 2020. – Vol. 8, No. 6. – DOI: 10.3390/jmse8060413.
5. Mišković N., Nad Đ., Rendulić I. Tracking Divers: An Autonomous Marine Surface Vehicle to Increase Diver Safety // IEEE Robotics & Automation Magazine. – 2015. – Vol. 22. – P. 72-84. – DOI: 10.1109/MRA.2015.2448851.
6. Kinsey J.C., Eustice R.M., Whitcomb L.L. A survey of underwater vehicle navigation: Recent advances and new challenges // Proc. IFAC Conf. Manoeuvering Control Marine Craft. – 2006. – P. 1-12.
7. Luo Q., Yan X., Ju C., Chen Y., Luo Z. An Ultra-Short Baseline Underwater Positioning System with Kalman Filtering // Sensors. – 2021. – Vol. 21, No. 1. – Article ID 143. – DOI: 10.3390/s21010143.
8. Braginsky B., Baruch A. Development of an Autonomous Surface Vehicle capable of tracking Autonomous Underwater Vehicles // Ocean Engineering. – 2020. – Vol. 197. – DOI: 10.1016/j.oceaneng.2019.106868.
9. Teledyne Marine Technologies Incorporated // URL: https://www.teledynemarine.com/ (дата обращения: 23.08.2024).
10. Barilaro L., Gauci J., Galea M., Filippozzi A., Vella D., Camilleri R. Innovative Multi-Unmanned Vehicle System for Enhancing Diver Safety: BEA // Aerotecnica Missili & Spazio. – 2024. – DOI: 10.1007/s42496-024-00198-5.
11. Система автоматического управления дроном сопровождения водолаза (патент RU 2 672 505, МПК B63C 11/46, B63B 21/00, B63G 8/16, G05D 1/00, опубл. 15.11.2018).
12. Wickert M., Siddappa C. Exploring the Extended Kalman Filter for GPS Positioning Using Simulated User and Satellite Track Data // Manuscript. – 2018. – P. 84-90. – DOI: 10.25080/Majora-4af1f417-00d.
13. Ang K.H., Chong G., Li Y. PID control system analysis, design, and technology // IEEE Transactions on Control Systems Technology. – 2005. – Vol. 13, No. 4. – P. 559-576. – DOI: 10.1109/TCST.2005.847331.
14. Fossen T.I. Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control. – John Wiley & Sons Ltd., 2011. — ISBN: 978-1-119-99149-6.

Информация об авторах

Тузова Анна Андреевна, инженер, Санкт-Петербургский Государственный Морской Технический Университет (СПбГМТУ), Россия, 190121, Санкт-Петербург, Лоцманская ул., д. 3, tuzova.smtu@yandex.ru, ORCID: 0000-0001-8471-450X

Кузнецов Андрей Геннадьевич, ведущий инженер, СПбГМТУ, Россия, 190121, Санкт-Петербург, Лоцманская ул., д. 3, andky@inbox.ru

Назаров Андрей Михайлович, начальник НИС МЭС, СПбГМТУ, Россия, 190121, Санкт-Петербург, Лоцманская ул., д. 3, nazarovmail@yandex.ru

Гойман Сергей Сергеевич, ведущий инженер, СПбГМТУ, Россия, 190121, Санкт-Петербург, Лоцманская ул., д. 3

Кожемякин Игорь Владиленович, начальник управления оборонных исследований и разработок, СПбГМТУ, Россия, 190121, Санкт-Петербург, Лоцманская ул., д. 3

Мониторинг относительного положения автономных подводных аппаратов в группе на основе анализа больших уклонения

С.А. Дубовик, А.А. Кабанов✉, И.Ю. Липко
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Севастопольский государственный университет» (ФГАОУ ВО СевГУ), Севастополь, Россия, kabanovaleksey@gmail.com

Аннотация
Во многих случаях эффективность использования автономных аппаратов возрастает, когда они применяются в составе группы. Для управления группой в составе бортового программного обеспечения всех или некоторых аппаратов необходимо иметь средства мониторинга относительного положения всех членов группы с целью избегания взаимных столкновений. В статье предлагается приближенный метод построения такого алгоритма для длительных передвижений аппаратов, в которых плотность группы может быть достаточно малой. В этом случае проблема мониторинга формулируется как задача контроля больших уклонений. Применяя принцип больших уклонений, стохастическая задача оценки вероятности столкновения сведена к детерминированной задаче оптимального управления. В рамках группы малой плотности факт столкновения рассматривается как редкое событие, к которому приводит совпадение факторов, которые образуют вполне определенную последовательность во времени – экстремаль задачи оптимального управления. В качестве приложения предлагаемого подхода рассматривается задача управления движением автономных подводных аппаратов, двигающихся в горизонтальной плоскости с постоянной продольной скоростью на заданной глубине. Для предельного решения усредненной системы в статье получена грубая оценка вероятности столкновения для двух аппаратов. Знание экстремали позволяет прогнозировать событие столкновения, что и используется в статье для оценки риска столкновений.

Ключевые слова
Большие уклонения, ситуационный прогноз, стохастическая система, прогнозирование риска, группа подводных аппаратов.

Благодарности
Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, шифр FEFM-2024-0015.

Monitoring of the relative position of autonomous underwater vehicles in a group based on the analysis of large deviations

Sergey A. Dubovik, Alexey A. Kabanov✉, Ivan Yu. Lipko
Federal State Educational Institution of Higher Education «Sevastopol State University» (Sevastopol State University), Sevastopol, Russia, kabanovaleksey@gmail.com

Abstract
In many cases, the effectiveness of autonomous vehicles increases when they are used as part of a group. In order to control a group, the onboard software of all or some of the vehicles must have a means of monitoring the relative position of all members of the group to avoid collisions. The paper proposes an approximate method of constructing such an algorithm for long apparatus movements in which the group density can be quite small. In this case, the monitoring problem is formulated as a large deviations control problem. Applying the principle of large deviations, the stochastic problem of collision probability estimation is reduced to a deterministic optimal control problem. In the framework of the low-density group, the fact of collision is considered as a rare event, which is caused by the coincidence of factors that form a well-defined sequence in time - the extremal of the optimal control problem. As an application of the proposed approach, we consider the problem of motion control of autonomous underwater vehicles moving in the horizontal plane with constant longitudinal velocity at a given depth. For the limiting solution of the averaged system, a rough estimate of the collision probability for two vehicles is obtained in the article. Knowledge of the extremal allows predicting the collision event, which is used in the article for collision risk assessment.

Key words
Large deviations, situational forecast, stochastic system, risk prediction, group of underwater vessels.

Acknowledgements
The work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, code FEFM-2024-0015.

Введение

Всякое движение объектов в составе группы осложняется риском столкновений. В случае же автономных подводных аппаратов (АПА), проблема осложняется еще многомерностью, нелинейностью и высокой неопределенностью. В такой ситуации важно понять, где применять точные методы и алгоритмы, а где возможно существенное снижение вычислительных мощностей. В этом смысле существенным параметром оказывается плотность группы, то есть минимальное расстояние между соседними аппаратами в группе – плотность обратно пропорциональна этому расстоянию. Многое упрощает разделение движений на быстрые и медленные, но в рассматриваемых задачах такие асимптотические постановки возможны только для групп с достаточно малой плотностью. Но на этом возможности асимптотических построений в случае малой плотности не заканчиваются: столкновение становится редким событием (РС), а уравнения стохастической динамики приобретают множителем при шуме малый параметр ε, характеризующий малую вероятность РС. В такой ситуации оказывается эффективным идемпотентное преобразование вероятности P [1-6]: $S = -\varepsilon \ln P$. Получаемое множество функционалов действия (нормированных [5]) и их экстремалей оказывается адекватным средством описания рассматриваемой предметной области и эффективным инструментом семантизации данных [7], позволяющим построить систему онлайн контроля критических ситуаций движения с помощью методов анализа больших уклонений [2-8] (или «max-plus control»). В линейном случае устойчивой системы (с аттрактором $\chi = 0$) оказывается возможным на основе предельного решения задачи оптимального управления реализовать принцип больших уклонений в форме ситуационного прогноза [9], позволяющего заблаговременно получать на борту информацию о возможном столкновении. Лежащее в основе прогноза предельное решение мы называем -профилем критического состояния.

В следующих разделах сформулирована постановка задачи, выполнен анализ больших уклонений при исследовании движения группы АПА с достаточно малой плотностью, когда удается линеаризовать задачу по переменным, которые описывают относительное положение аппаратов. Особенность рассматриваемой задачи мониторинга группового движения в том, что аттрактор в принципе не может быть нулевым. В связи с этим для построения -профиля здесь используется решение задачи оптимального (и терминального) управления в форме обратной связи, что позволяет обойти указанную трудность.

Постановка задачи мониторинга относительного положения АПА в группе

Рассмотрим движение двух АПА в горизонтальной плоскости вдоль продольной оси земной системы координат, то есть в ситуации, когда их курсы параллельны продольной оси координатного трехгранника. Движение АПА будем считать близким к прямолинейному с постоянной продольной скоростью u_e и на заданной глубине, которое можно представить системой пятого порядка в переменных (в связанной с АПА системе координат): $X = (\psi,\ r)^T$ – угол (рад) и скорость (рад/с) рыскания, $Y = (x, y,\ v)^T$– продольное, поперечное перемещения (м) и поперечная скорость (м/с). Используя еще инерционные коэффициенты $m_{jj},\ j = 1,2,3$, и $\Delta m = m_{11} - m_{22}$ (кг) а также коэффициенты гидродинамического демпфирования $d_{jj},\ j = 1,2,3$ (кг/с), представим уравнения возмущенного движения АПА в обозначенных компонентах

$$\dot{y} = u_e\psi + v,$$
$$\dot{v} = (-d_{22}v - m_{11}u_e r + \tau_v)/m_{22} + b_1\dot{w}_2, \quad (1)$$
$$\dot{x} = u_e - v\psi,$$
$$\dot{\psi} = r + B_{1,3}\dot{w}_3,$$
$$\dot{r} = (-d_{33}r + \Delta m u_e v + \tau_r)/m_{33} + B_{2,1}\dot{w}_1.$$

Рассматривая поперечное движение произвольного АПА, вектор состояния динамики $\tilde{x} \in R^N$ можно представить в блочной форме $\tilde{x} = \begin{pmatrix}\tilde{z}_1\\ \tilde{z}_2\end{pmatrix}$, где $\tilde{z}_1 \in R^2$ – координата y центра масс аппарата и скорость поперечного движения в заданном плоском сечении земной системы координат. Указанные блоки вектора состояния удовлетворяют сингулярно возмущенной системе уравнений:

$$\dot{\tilde{z}}_1 = J_0\,\tilde{z}_1 + b_0 c\tilde{z}_2, \qquad J_0 = \begin{pmatrix}0 & 1\\ 0 & 0\end{pmatrix},\ b_0 = \begin{pmatrix}0\\1\end{pmatrix},\ \ c = (1\ 0\ \cdots\ 0),$$
$$\dot{\tilde{z}}_2 = (A_1\tilde{z}_2 + b_1\tilde{u} + \sqrt{\lambda}g_1\dot{w})/\lambda, \quad (2)$$

где $\tilde{z}_2 \in R^{N-2}$, $\dot{w}$ – стандартный «белый шум», $\lambda > 0$ – малый параметр, A_1 и b_1 – матрицы, характеризующие динамику поперечного движения. Относительно управления $\tilde{u} = D\tilde{x}, D = (d_0 d_1)$, предположим, что оно обеспечивает гурвицевость матрицы $\bar{A}_1 = A_1 + b_1 d_1$.

В [5] доказано (теорема 3.1, гл. 7), что при определенных условиях и $\lambda \to 0$ процесс $\tilde{z}$ в (2) слабо сходится к z, удовлетворяющему уравнению

$$\dot{z} = A_0 z + \sqrt{\lambda}G_0\dot{w}, \quad (3)$$

где

$$A_0 = J_0 + B_0 d_0, B_0 = -b_0\beta_0, \beta_0 = \mathrm{c}(\bar{A}_1)^{-1}b_1,\ G_0 = -b_0\gamma_0,\ \gamma_0 = \mathrm{c}(\bar{A}_1)^{-1}g_1. \quad (4)$$

Понятно, что представление (3) возможно лишь приближенно, например, асимптотически, причем конкретный вид асимптотики будет зависеть от примененного алгоритма стабилизации каждого АПА. Стабилизация возможна и в нелинейном случае, но поскольку управление не является темой этой работы, ограничим комментарий по алгоритму асимптотики именно линейным стационарным случаем.

В постановке задачи будем предполагать, что движение каждого аппарата стабилизируется около выделенной ему номинальной прямолинейной траектории, что в поперечном движении соответствует частным аттракторам $\chi_i, i = 1,2$. Тогда относительное движение каждой пары аппаратов можно представить в земной системе координат с учетом линеаризованной редуцированной модели (3), (4) каждого АПА вектором

$$X^{\varepsilon}(t) = (y_1\ v_1\ y_2\ v_2)^T, \quad (5)$$

где y_1 , y_2 и $v_1,\ v_2$ – координаты (в земной системе) и поперечные скорости (соответственно) первого и второго АПА в горизонтальной плоскости; будем использовать также блоки: $X_i^{\varepsilon} = (y_i\ v_i)^T,\ i = 1,2$, а также учтем, что $\chi = \chi_1 \cup \chi_2$.

Рассматривая взаимное поперечное движение любой пары аппаратов, имея их линеаризованные редуцированные модели (3), (4), можно записать вектор $X^{\varepsilon}(t) = col(X_1^{\varepsilon}(t), X_2^{\varepsilon}(t)) \in R^4$ и для каждого подвектора X_i^{ε} формируем модель (3), рассчитывая ее параметры (4) по модели (2), принимая $\varepsilon = \sqrt{\lambda}$. В результате получаем систему взаимного поперечного движения любой пары АПА, как единую стохастическую систему для $X^{\varepsilon}(t)$:

$$\dot{X}^{\varepsilon} = a(X^{\varepsilon}) + \varepsilon\sigma(X^{\varepsilon})\dot{w}, X^{\varepsilon}(t_0) = X_0^{\varepsilon} \in D, \quad (6)$$

где $\dot{w}$ – k -вектор «белого шума», a, σ– гладкие матричные функции, $\varepsilon > 0$– малый параметр.

Заметим, что в рамках принятой системы координат, структуры системы (2) и соответствующей ей вырожденной системы (3), (4) второго порядка, можно упростить обозначения, приняв в (6) разделение на блоки:

$$X_1^{\varepsilon} = (y_1\ \ v_1)^T,\ X_2^{\varepsilon} = (y_2\ \ v_2)^T,\ A_i = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_i^2 & -2\xi_i\omega_i \end{pmatrix},\quad i = 1,2, \quad (7)$$

$$a(X^{\varepsilon}) = A = diag(A_{01},\ A_{02}), \sigma(X^{\varepsilon}) = \sigma = diag(G_{01}\ G_{02}),\ \mathrm{C} = diag(\mathrm{C}_1,\ \mathrm{C}_1),\ C_1 = (1\ \ 0),$$

параметры которых определяются согласно (3), (4).

Задача состоит в том, чтобы построить оценку взаимной близости любой пары аппаратов из группы, движущихся параллельными курсами, чтобы при необходимости предотвратить столкновение, заблаговременно подправив траектории определенных АПА.

Указанную проблему можно рассматривать в зависимости от плотности расположения аппаратов в группе. Дело в том, что логика всей миссии может потребовать сближения аппаратов на каких-то коротких участках, например, при движении в узкостях, и, наоборот, расхождения и относительно продолжительного движения на параллельных курсах при длительных переходах между промежуточными точками маршрута. В этих двух ситуациях шум проявляется принципиально по-разному: в первом случае событие столкновения не может считаться редким и для его идентификации необходим непрерывный контроль относительных координат и точные методы оценивания состояния (например, Калмановская фильтрация и ее различные модификации), второй случай близок к ситуации больших уклонений и допускает более грубые подходы в оценках, в том числе вероятностных. Именно второй случай рассматривается в данной работе.

Предлагаемый в работе способ прогноза (ситуационный прогноз) основан на принципе больших уклонений (ПБУ). В свою очередь, в основе ПБУ лежит установление некоторой единственной последовательности состояний, ведущих к критическому событию (КС) – профиль КС. В результате оказывается, что нет необходимости дожидаться приближения к КС, так как сигналом тревоги, инициирующим необходимые действия, становится попадание в ε - трубку χ -профиля КС.

Анализ больших уклонений на протяженных переходах

Опираясь на модель группы достаточно малой плотности (ГДМП), рассматриваем стохастическую систему взаимного поперечного движения любой пары аппаратов (6). Будем считать, что невозмущенная система (получается из (6) при $\varepsilon = 0$):

$$\dot{X} = a(X), \quad (8)$$

имеет в области D с гладкой границей ∂D единственный аттрактор χ и, как принято считать, $\chi = 0$.

Наряду со стохастической системой (6) и невозмущенной системой (8) введем детерминированное (и неоднородное) уравнение, которое назовем системой путей*:*

$$\dot{\varphi} = a(\varphi) + \sigma(\varphi)u, \varphi(t_0) = X_0 = \varphi_0. \quad (9)$$

Здесь u – суммируемая функция, для нее (и для (9)) определим функционал действия (ФД):

$$S_{t_0t_f}(\varphi,u)=\frac{1}{2}\int_{t_0}^{t_f}u^Tudt, \tag{10}$$

конечный в классе абсолютно непрерывных на $[t_0,t_f]$ функций. Границу ∂D представим соотношением

$$C\big(\varphi(t_f)-\varphi_f\big)=C\varphi(t_f)-z_f=0, \tag{11}$$

где $z_f\in R^r,\ r\le n$, C – матрица полного ранга.

Вероятностный смысл задачи на минимум (10) при ограничениях (9), (11) и ее связь с диффузионным процессом (6) заключены в принципе больших уклонений [5]:

$$\lim_{\varepsilon\to 0}\varepsilon^2\ln P\{X^\varepsilon(t)\in R^n\backslash D\}=-\min_{\varphi\in F}S_{t_0t_f}(\varphi,u), \tag{12}$$

где $F=\{\varphi\in C_{t_0t_f}(R^n):\ \varphi(t_0)\in D,\varphi(t_f)\in R^n\backslash D\}$.

Определим еще квазипотенциал системы путей (9) относительно аттрактора невозмущенной системы (8) как $V(\chi,x)=\inf\{S_{t_0t_f}(\varphi):\varphi\in C_{t_0t_f}(R^n):\ \varphi_{t_0}=\chi,\varphi_{t_f}=x\}$.

Квазипотенциал – это не что иное, как функция достижимости [10] для (9). В фазовом пространстве устойчивой системы квазипотенциал формирует семейство концентрических эллипсоидов [10] с центром в χ, но определяется он на некоторой единственной кривой, ведущей из χ в критическую точку z_f. Эту кривую мы называем χ -профилем z_f и обозначаем как $\hat{\varphi}$.

Как следует из определения, для вычисления χ -профиля z_f нужно уметь довести решение задачи (9)-(11) из заданной точки z_f до точки φ_0, принадлежащей достаточно малой окрестности аттрактора χ. В общем случае задачи (9)-(11) сделать это численно трудно, поэтому приходится искать различные упрощения.

С учетом (7) можно представить уравнение путей

$$\dot{\varphi}=A\varphi+\sigma u, \tag{13}$$

а также условие невозмущенного движения (8)

$$y_2-y_1=l. \tag{14}$$

Задача (9)-(11) с уравнением (9) в виде (13) разрешима явно через решение в форме обратной связи [9]:

$$\hat{\varphi}=e^{A_{cl}t}\varphi_0+\int_{t_0}^{t}e^{A_{cl}(t-\tau)}K\varphi_f, \tag{15}$$

$$K=\sigma^TW^TC^TM^{-1}C,\ A_{cl}=A-\sigma KCW, W=e^{A(t_f-t)},\ M=C(WDW^T-D)C^T,$$

где матрица D является решением уравнения Ляпунова $AD+DA^T-\sigma\sigma^T=0$.

Минимальное значение функционала (10):

$$S_{t_0t_f}=\big(W(t_0)\varphi_0-\varphi_f\big)^TC^TM^{-1}C\big(W(t_0)\varphi_0-\varphi_f\big). \tag{16}$$

Вычисление -профиля и вероятности столкновения АПА

Продолжая рассмотрение относительного движения двух АПА на основе -профиля, нужно еще раз отметить, что формула (15) получена для линейного случая; это, в частности, означает, что аттрактор χ есть ноль: $\chi=0$. Для двух аппаратов, движущихся на расстоянии l друг от друга, это уже не так. Проблема решается введением вектора постоянного сдвига $\Delta l=(0\ \ 0\ \ l\ \ 0)^T$, замены переменных $y_{l2}=y_2-l$, что приводит к измененной системе путей (13):

$$\dot{\varphi}_l=A\varphi_l+A_l\Delta l+\sigma u,\ A_l=diag(0,\ A_{02}),\ \varphi_l=\varphi-\Delta l. \tag{17}$$

Решение задачи (10), (11), (17) можно записать на основе (15), (16) с учетом соответствующей замены:

$$\hat{\varphi}_l=e^{A_{cl}t}(\varphi_{l0}+\Delta l)+\int_{t_0}^{t}e^{A_{cl}(t-\tau)}K(\varphi_{lf}+\Delta l), \tag{18}$$

$$S_{l,t_0t_f}(\varphi_{l0},\varphi_{lf})=\big(W(t_0)(\varphi_{l0}+\Delta l)-\varphi_{lf}-\Delta l\big)^TC^TM^{-1}C\big(W(t_0)(\varphi_{l0}+\Delta l)-\varphi_{lf}-\Delta l\big),$$

$$\varphi_{lf}=\big(y_1(t_f)\ 0\ y_{l2}(t_f)\ 0\big)^T=(\hat{y}\ 0\ \hat{y}\ \ 0)^T, y_{l2}(t_f)=y_1(t_f)=\hat{y}.$$

Определить наиболее вероятную координату столкновения $\hat{y}$ можно, вычислив экстремум $S_{t_0t_f}$ по y_1. Запишем блочное представление для матрицы M: $M=diag(M_1M_2)$. С учетом указанной структуры аттрактора χ, обозначения $\varphi=col(\varphi_1,\varphi_2)\in R^4$ и условия (14) при $l>0$ приходим к задаче $S_{t_0t_f}(\chi,\varphi)\to\min_{y_1}$

$$\frac{dS_{t_0t_f}(\chi,\varphi)}{d\varphi} = M^{-1}C\varphi = M^{-1}(y_1\ \ y_2)^T = M^{-1}(y_1\ \ y_1 + l)^T = (M_1^{-1} + M_2^{-1})y_1 + lM_2^{-1} = 0,$$

откуда получаем граничное условие для (17): $y_1(\mathrm{t}_f) = y_{2l}(\mathrm{t}_f) = \hat{y} = -l\frac{M_2^{-1}}{M_2^{-1}+M_1^{-1}}$.

Вычисленные для каждого аппарата φ_1,$\varphi_{l2} \in R^2$ по формулам (18), где в качестве граничного условия подставлено $\hat{y}$, дают, в совокупности, -профиль столкновения $\hat{\varphi}$: $(-\infty, t_f] \to R^4$.

Пусть теперь определен момент t, когда

$$X_1^\varepsilon(t) = \hat{\varphi}_1(t) + \Delta_1,\ X_2^\varepsilon(t) = \hat{\varphi}_2(t) + \Delta_2,$$

где евклидовы нормы Δ_1 и Δ_2 меньше ε, то есть в этот момент траектории движения АПА оказались в -трубке χ-профиля столкновения. На указанный момент t и по прошествии не менее $t_f - t$ (с) возможно столкновение аппаратов 1 и 2 с вероятностью

$$P_{tt_f} \approx e^{-(S_{tt_f})/\varepsilon^2}, \qquad (19)$$

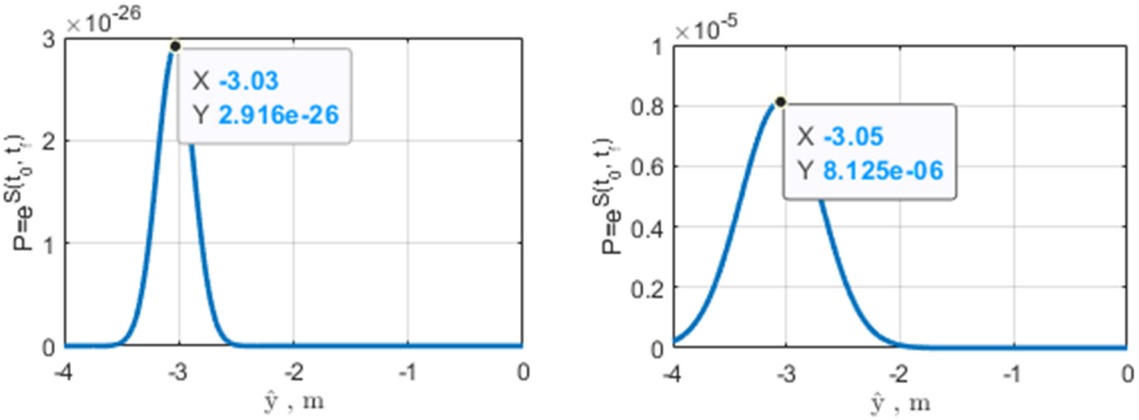
где приближенный характер (19) определяется тем, что оно асимптотическое по ε с точностью до логарифмической эквивалентности (как в (12)).

В целом на основе анализа выражения для минимального значения функционала действия можно определить наиболее вероятный момент времени, начиная с которого траектории движения АПА окажутся в -трубке χ-профиля столкновения.

Вычисление χ -профиля и вероятности столкновения АПА

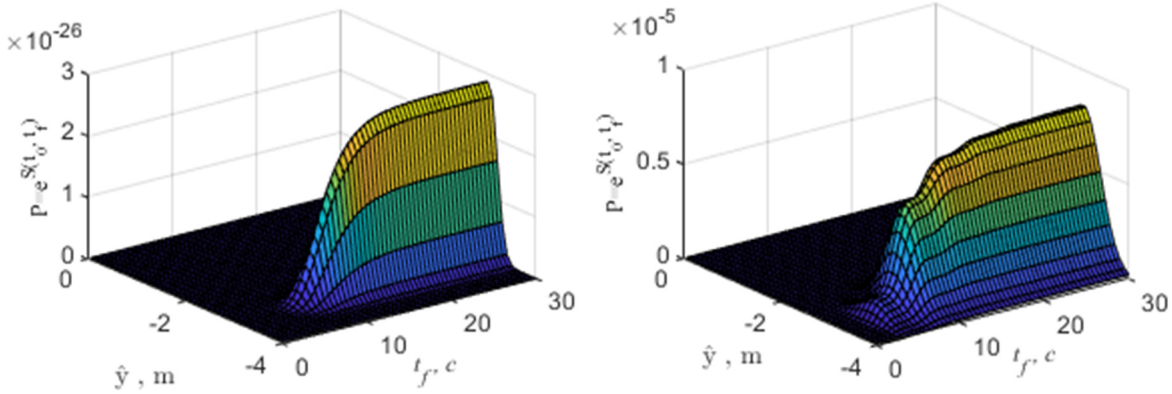
Для численного моделирования взяты следующие значения относительных коэффициентов затухания ξ_1, ξ_2 матрицы $A = diag(A_1,\ A_2)$ системы путей (13): вариант 1 соответствует апериодическому режиму с параметрами $\xi_1 = 1.77,\ \xi_2 = 0.88$, вариант 2 – режиму осциллятора с параметрами $\xi_1 = 0.35,\ \xi_2 = 0.18$, где коэффициенты затухания уменьшены примерно в пять раз. На рис.1 представлены графики изменения функционала действия в зависимости от значения координаты столкновения $\hat{y}$ (а – вариант 1, б – вариант 2), откуда видно, что настройка конкретных параметров стабилизации каждого АПА (в конечном итоге параметров матриц $A_{01},\ A_{02}$, которые определяются величиной $\beta_0 = \mathrm{c}(\bar{A}_1)^{-1}b_1$ в (4), где матрица $\bar{A}_1$ – это гурвицева матрица быстрой подсистемы соответствующего АПА) практически не влияют на величину $\hat{y}$. Также видно, что апериодический характер системы приводит к уменьшению вероятности P_{0t_f} без малого на двадцать порядков (вариант 1 – $P_{0t_f} = 2.916e-26$, вариант 2 – $P_{0t_f} = 8.125e-06$). На рис.2 представлены зависимости изменения функционала действия от координаты столкновения $\hat{y}$ и времени столкновения t_f. Откуда видно, что, начиная с $t_f > 16$ с, рост вероятности составляет менее 5%, следовательно, для моделирования -профиля достаточно взять $t_f = 16$ с.

На рисунке 3 представлены -профили столкновения двух аппаратов для обоих вариантов. Верхние графики показывают компоненты поперечных перемещений первого и второго АПА, нижние графики вероятности при $\varepsilon = 1$, все в функции времени. В этих примерах нужно отметить роль относительных коэффициентов затухания ξ_1, ξ_2 матрицы $A = diag(A_{01},\ A_{02})$, значения которых зависят от конкретной настройки системы стабилизации АПА. Здесь в качестве одного из возможных требований к проектированию системы стабилизации подвектора $\tilde{z}_2 \in R^{N-2}$ в (3) можно взять минимизацию вероятности столкновения, которая ниже для апериодического варианта настройки. Но даже если колебательность в системе будет вполне ощутимой, как на рисунке 3б, возможное в результате колебаний столкновение вполне может быть спрогнозировано по кривой ФД, благодаря которой (в силу ее монотонности) все точки -профиля оказываются упорядоченными по вероятности столкновения. По этой причине попадание текущего состояния $X^\varepsilon(t)$ системы (6) в -трубку χ -профиля КС в момент $t = t_1$ дает информацию о двух вещах: 1) вероятности $P_{t_1t_f}$, 2) времени $\tau = t_f - t_1$ до столкновения в худшем случае. Последнее означает, что $X^\varepsilon(t)$ при $t > t_1$ и до столкновения, скорее всего покинет -трубку χ-профиля КС с возможным последующим возвращением в нее, и так далее; и только в худшем случае, с априорно малой вероятностью, дальнейшее движение $X^\varepsilon(t)$ до столкновения продолжается в пределах указанной ε-трубки. Указанная информация позволяет в каждый момент ее поступления организовать, при необходимости, дополнительное корректирующее воздействие на процесс движения АПА. Проблема формирования такого корректирующего импульса – это уже предмет отдельной статьи.



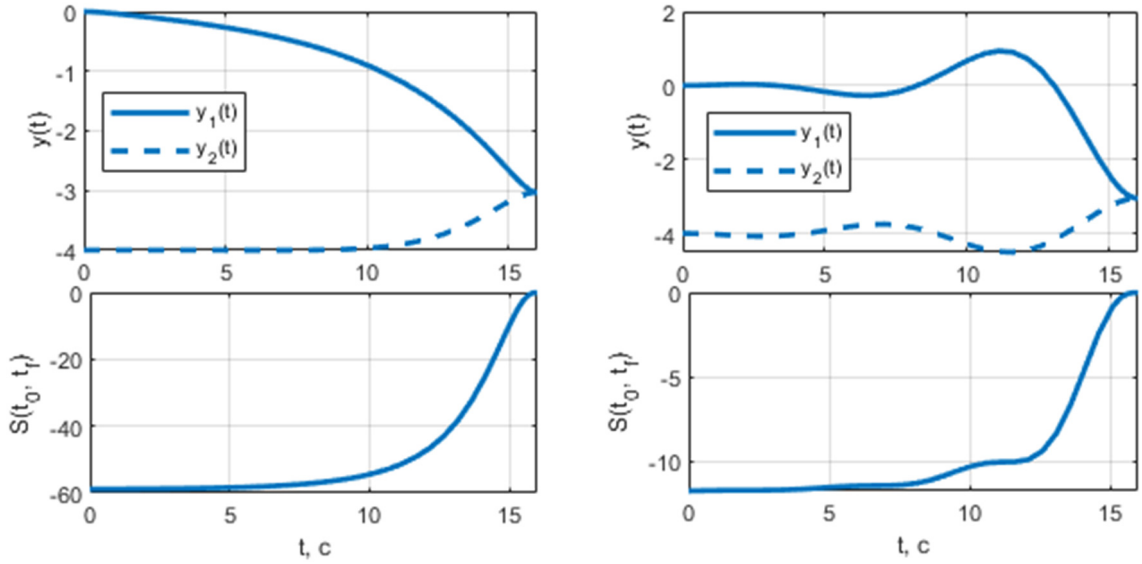
а) **б)**

Рисунок 1 — Зависимость функционала действия от координаты столкновения $\hat{y}$: а) вариант 1; б) вариант 2



а) **б)**

Рисунок 2 — Зависимость функционала действия от координаты столкновения $\hat{y}$ и времени столкновения t_f: а) вариант 1; б) вариант 2



а) **б)**

Рисунок 3 — χ-профиль столкновения $\hat{\varphi}$ и вероятность: а) вариант 1; б) вариант 2

Заключение

Подводя итоги, заметим, что плоская задача мониторинга группового движения выбрана здесь лишь для упрощения изложения, сокращения объема статьи и вычислений. Предлагаемый подход вполне может быть распространен на 3D-задачи. Подчеркнем также, что принятая в этой статье методика [6] реализации ПБУ не

предполагает условий равномерной невырожденности матрицы диффузии, как в [5], а ограничивается требованиями управляемости (по возмущениям) и гурвицевости, что более естественно для рассматриваемых задач управления. Кроме того, к преимуществам функционального подхода [6] относятся более широкие возможности по моделям возмущений в задачах контроля больших уклонений, которыми авторы в дальнейшем планируют воспользоваться для совершенствования алгоритмов мониторинга движения автономных объектов.

Литература

1. Литвинов Г.Л. Деквантование Маслова, идемпотентная и тропическая математика: краткое введение // Записки научных семинаров Санкт-Петербургского отделения математического института им. В.А. Стеклова РАН, 2005. Т. 326, № 13. С. 145-182.
2. Fleming W.H. Max-plus stochastic processes // Appl. Math. Optim., 2004. no. 49. P. 159-181.
3. Liptser R. S., Puhalskii A.A. Limit theorems on large deviations for semimartingales // Stochastic and Stochastics Reports, 1992. No. 38. P. 201-249.
4. Puhalskii A. On the theory of large deviations // Theory Probab. Appl., 1993. Vol. 38, no 3. P. 553–562.
5. Вентцель А.Д., Фрейдлин М.И. Флуктуации в динамических системах под действием малых случайных возмущений. – М.: Наука, 1979. 424 с.
6. Пухальский А.А. Большие уклонения стохастических динамических систем. Теория и приложения. – М.: Физматлит, 2005. 512 с.
7. Дубовик С.А. Асимптотическая семантизация данных в системах управления // Мехатроника, автоматизация, управление, 2019. Т. 20(8). С. 461-471.
8. Fleming W., Soner H. Controlled Markov Processes and Viscosity Solutions // New York: Springer Science+Business Media, Inc., 2006. 441 p.
9. Дубовик С.А., Кабанов А.А. Асимптотический метод прогнозирования рисков в задачах стохастического контроля и управления // Мехатроника, автоматизация, управление, 2022. Т. 23 (8). С. 395-405.
10. Поляк Б.Т. Робастная устойчивость и управление / Б.Т. Поляк, П.С. Щербаков. – М.: Наука, 2002. 303 с.

Информация об авторах

Дубовик Сергей Андреевич, д.т.н., профессор, профессор, ФГАОУ Севастопольский государственный университет (СевГУ), Россия, 299053, Севастополь, ул. Университетская, д. 33, duboviksa@gmail.com

Кабанов Алексей Александрович, к.т.н., доцент, директор института, СевГУ, Россия, 299053, Севастополь, ул. Университетская, д. 33, kabanovaleksey@gmail.com, ORCID: 0000-0002-3105-7283

Липко Иван Юрьевич, н.с., СевГУ, Россия, 299053, Севастополь, ул. Университетская, д. 33, ivanlipko@yandex.ru, ORCID: 0009-0007-8447-7162

Разработка технологии сопряженных расчетов динамики подводного реконфигурируемого аппарата и гидродинамики, обтекающей его жидкости

К.К. Забелло, Н.А. Щур
Государственный научный центр Российской Федерации «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики» (ГНЦ РФ ЦНИИ РТК), Санкт-Петербург, Россия, k.zabello@rtc.ru, n.tschur@rtc.ru

Аннотация
В настоящей статье представлена математическая модель реконфигурируемых подводных аппаратов с учетом гидродинамики обтекающей их жидкости. Апробация предлагаемой модели проведена путем расчета реконфигурации подводного аппарата типа мурена из прямой в П-образную форму. Математическая модель предполагает совместное решение уравнений динамики для нескольких связанных тел и уравнений Навье-Стокса. По результатам расчетов установлено, наличие остаточных затухающих колебаний после реконфигурации.

Ключевые слова
Деформируемые сетки, алгоритм деформации, реконфигурируемый подводный аппарат, сопряженный расчет, взаимодействие тела с потоком, вычислительная гидрогазодинамика.

Благодарности
Работа выполнена в рамках Государственного задания № 075-00697-24-00 от 27.12.2023 г. 1021060307689-7-1.2.1;2.2.2 Исследование путей создания и областей возможного применения биоморфных подводных роботов (FNRG-2022-0013).

Development of a technology for conjugated calculations of the dynamics of an underwater reconfigurable apparatus and the hydrodynamics of the fluid flowing around it

Konstantin K. Zabello, Nikolai A. Tschur
Russian state scientific center for robotics and technical cybernetics, St. Petersburg, Russia, k.zabello@rtc.ru, n.tschur@rtc.ru

Abstract
This article presents a mathematical model of reconfigurable underwater vehicles, taking into account the hydrodynamics of the fluid flowing around them. The approbation of the proposed model was carried out by calculating the reconfiguration of a moray type underwater vehicle from a straight line to a U-shape. The mathematical model assumes a joint solution of the equations of dynamics for several connected bodies and the Navier-Stokes equations. According to the results of calculations, the presence of residual damped oscillations after reconfiguration is established.

Key words
Deforming meshes, deformation algorithm, reconfigurable underwater vehicle, conjugate calculation, fluid body interaction, computational fluid dynamics.

Acknowledgements
The work was carried out within the framework of State Task No. 075-00697-24-00 dated December 27, 2023. 1021060307689-7-1.2.1;2.2.2 Investigation of ways to create and areas of possible application of biomorphic underwater robots (FNRG-2022-0013).

Введение

Подводные роботы стали незаменимым инструментом для океанографов, морских биологов и даже военных. Эти роботы предназначены для исследования глубин океана, сбора данных и выполнения различных задач.

Однако большинство вариантов подводных роботов не предполагает изменение своей формы в процессе работы. Между тем изменение формы позволяет сочетать в себе свойства сразу нескольких подводных аппаратов. Например, принимая торпедообразную форму, такой аппарат будет жертвовать маневренность в угоду скорости и энергоэффективности, что позволит ему перемещаться на большие расстояния до точки работы, а достигнув цели, аппарат снова изменит форму с целью увеличения манёвренности. Примером такого робота является робот-зонтик от компании Blue Robotics [1].

К сожалению, есть лишь единичные работы в этом направлении. Однако ни в одной из работ не делается попыток создать математическую модель реконфигурируемого аппарата с учетом гидродинамики, обтекающей аппарат жидкости. Данная работа является первым шагом в попытке заполнить этот пробел.

Постановка задачи

Апробация разрабатываемой технологии выполняется на модели подводного аппарата типа мурена (рис. 1 (а)). Корпус аппарата имеет вытянутую торпедообразную форму с круглым поперечным сечением на концах и в середине аппарата и с эллиптическим сечением в местах утолщения. По бокам вытянутого корпуса прикреплены 3 пары движителей, по одному слева и справа от аппарата.

Представленный аппарат является реконфигурируемым, то есть имеет возможность изменять свою форму. Изменение формы аппарата обеспечивается наличием поворотных механизмов (всего 12 штук), расположенных в местах крепления движителей и внутри корпуса аппарата. В настоящей работе рассматриваются только два поворотных механизма с плоскостью вращения, расположенной под 45º к оси аппарата (рис. 1б). Данные поворотные механизмы обеспечивают возможность преобразования из базовой конфигурации аппарата в П-образную путем поворота механизмов на 180º. Именно процесс перехода из прямой в П-образную конфигурацию является целью моделирования в настоящей работе.

В ходе реконфигурации аппарат представляется в виде совокупности трех тел (секций) (рис. 1а). Каждая из секций имеет свой центр масс и центр объема, а также вектор осевых моментов инерции (J_{ii}, $J_{ij} = 0$). Массы секций одинаковы. Помимо массовых характеристик для корректного расчета гидродинамики подводного аппарата необходимо задание присоединенных масс и осевых моментов инерции (J'_{ii},$J'_{ij} = 0$). Коэффициенты для данных величин получаются из допущения, что секция – эллиптический цилиндра с полуосями 0.07 и 0.1 м [2]. Плавучесть аппарата полагается равной нулю. В процессе реконфигурации проекции массовых и присоединенных величин пересчитываются в соответствии с изменением ориентации секции в пространстве.

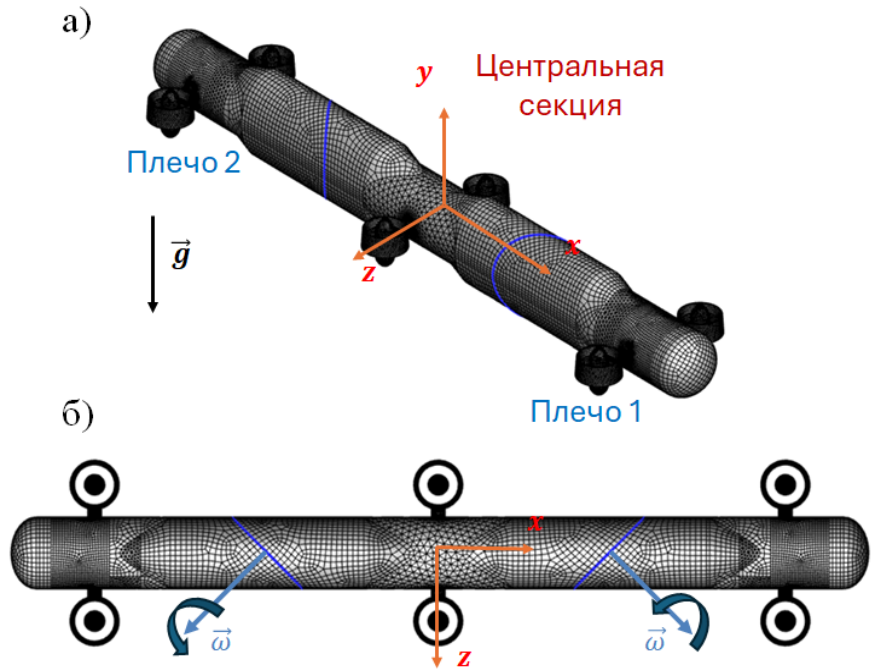


Рисунок 1 — Аппарат типа мурена: а) общий вид; б) вид сверху

Реконфигурация аппарата происходит путем задания предписанного равноускоренного вращения плеч по следующему закону:

$$\vec{\omega}(t) = \begin{cases} \vec{\beta}t, \; t \le T/2 \\ \vec{\omega}(T/2) \; - \vec{\beta}(t - T/2), \; T/2 < t \le T \\ 0, \; t > T \end{cases} \qquad (1)$$

где $\vec{\omega}$ – вектор угловой скорости плеча, $|\vec{\beta}| = 3.2 \cdot 10^{-3}$ рад/с^2 – угловое ускорение, $T = 62.83$ с – время перехода из прямой конфигурации в П-образную. Максимальная угловая скорость плеч – 0.1 рад/с.

Динамика аппарата считается в два шага:

1. Рассматривается система отсчета, связанная с центром масс аппарата (рис. 2а), относительно которой задается движение центров масс секций. Движение боковых секций известно из закона вращения плеч (1). Движение центральной секции задается таким образом, чтобы выполнялись законы сохранения количества движения:

$$\sum_{i=1}^{3} m_i \vec{v}_i = 0\,;\ \sum_{i=1}^{3} \underline{\underline{J_i}} \cdot \vec{\omega}_i = 0, \qquad (2)$$

где m_i – масса секции, $\vec{v}_i$ – трансляционная скорость секции, $\underline{\underline{J_i}}$ – тензор моментов инерции секции ($J_{ij} = 0$). Определив новое положение и ориентацию каждой из секций аппарата, вычисляется новое положение центра объема аппарата относительно центра масс (рис. 2б).

2. Полученная с предыдущего шага конфигурация аппарата рассматривается как абсолютно твердое тело, что позволяет решать уравнения динамики относительно центра масс всего аппарата. Совместно с уравнением динамики решается система уравнений Навье-Стокса, что позволяет учесть гидродинамические силы, действующие на аппарат. Далее следует переход на следующий шаг по времени.

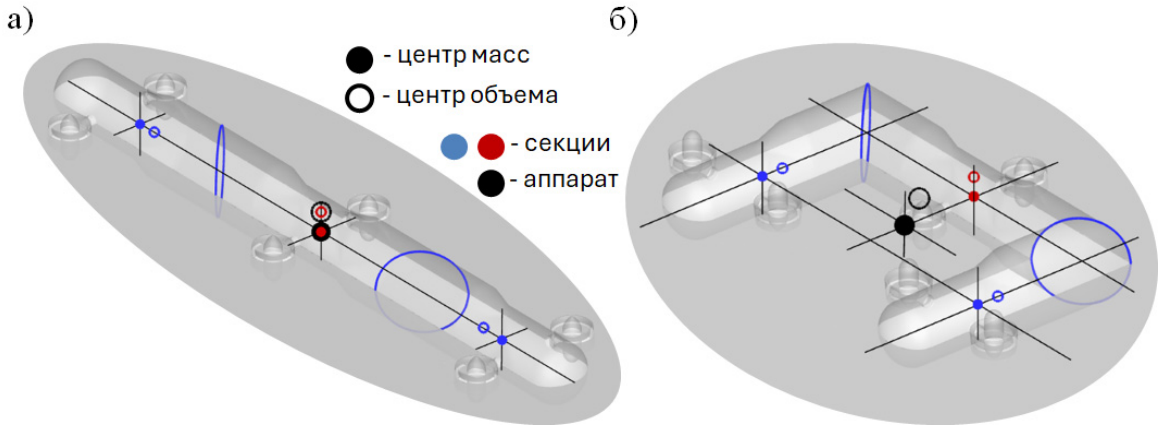


Рисунок 2 — Пример расположения центра масс и центра объема: а) в прямой конфигурации$ б) П-образной конфигурации

Расчеты проводились с использованием пакета ANSYS Fluent 2019. Учет движения границ расчетной области осуществлялся с использованием деформируемых расчетных сеток с авторским алгоритмом деформации. Деформация сетки и описанная выше схема решения уравнений динамики аппарата были реализованы через механизм пользовательских функций (UDF). Задача рассматривалась в URANS постановке с использованием модели турбулентности k-ω SST Ментера (число Рейнольдса, построенное по максимальной скорости плеча составляет $7 \cdot 10^3$). Использовался второй порядок аппроксимации по пространству и первый порядок аппроксимации по времени. Размерность расчётной сетки составила 1.7 млн ячеек. Шаг по времени задавался равным 0.04 с.

Результаты расчетов и обсуждение.

Каноническим тестом для анализа гидродинамики в задачах Fluid Structure Interaction, является определение значений присоединенных масс и моментов инерции при равноускоренного движении. В данном случае рассматривается присоединенный момент инерции.

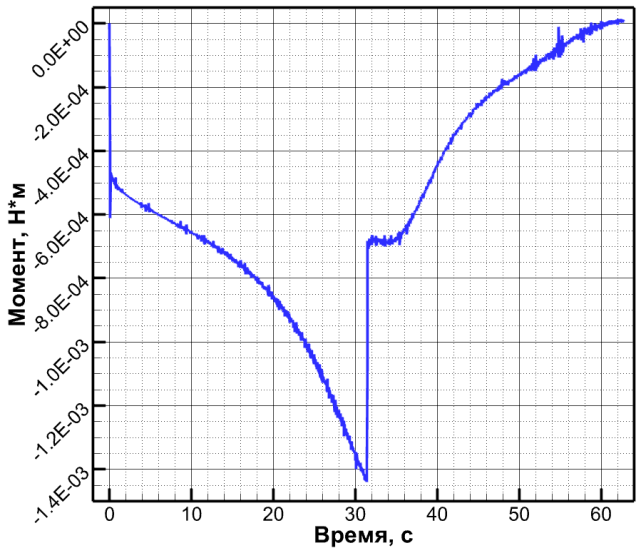


Рисунок 3 — Эволюция гидродинамического момента относительно оси поворота плеча

На рисунке 3 приведена эволюция гидродинамического момента действующего на ось вращения плеча. Где явно выделяются два разрыва - в начальный момент времени и в середине реконфигурации, когда вектор ускорения меняет знак на противоположный (1). В обоих случаях происходит скачкообразное изменение ускорения. Первыми со стороны жидкости на данное изменение ускорения реагируют нестационарные силы такие как: сила присоединенных масс, сила Бассе и др. Однако все моменты имеют значение порядка 10^{-5} Н·м за исключением момента, связанного с присоединенным моментом инерции, который на порядок больше. Таким образом, действием всех нестационарных сил, за исключением присоединенных масс можно пренебречь.

В таблице 1 приведено сравнение присоединенного момента инерции относительно оси вращения плеча из расчета с аналитическим значением, полученным в приближении эллиптического цилиндра. Как видно из таблицы, значение присоединенного момента инерции хорошо коррелирует с аналитическим значением в приближении цилиндра, что говорит о корректности модели.

Таблица 1 — Сравнение присоединённого момента инерции из расчета с аналитическим значенем

Аналитика [1], кг·м^2	**Расчет, кг·м^2**
0.1603	0.1519

Также были рассмотрены различные варианты балансировки аппарата в боковых секциях. Во всех случаях после реконфигурации аппарата наблюдались затухающие вращательные колебания. Данные колебания отчетливо видны на графике эволюции моментов действующих на аппарат (рис. 4). Причина данных колебаний связана с метацентрическим моментом.

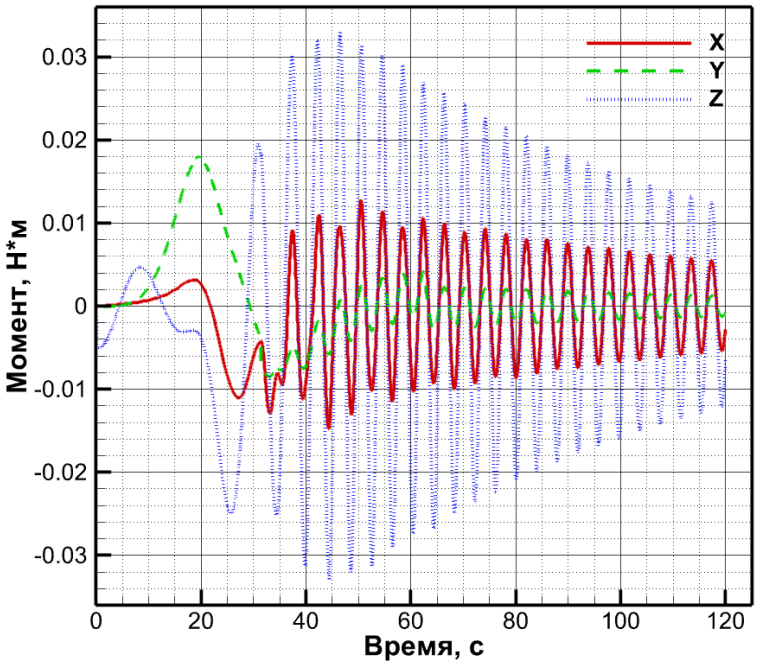


Рисунок 4 — Эволюция моментов сил, действующих на аппарат вдоль главных осей

Как известно, наиболее устойчивым положением тела под водой является случай, когда центр объема расположен над центром масс. В случае отклонения тела от этого состояния возникает метацентрический моменты, стремящийся вернуть тело в устойчивое положение.

После реконфигурации аппарат не сразу принимает устойчивое положение, как следствие, возникает колебательный процесс, подобный математическому маятнику. Затухание колебаний обеспечивается действием сил сопротивления со стороны жидкости.

Пользуясь предположением о малости угла отклонения от устойчивого положения и нулевой плавучестью аппарата можно вывести формулу для оценки частоты данных колебаний:

$$\nu = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{mgh}{J+J'}} \qquad (3)$$

В таблице 2 приведено сравнение частоты, полученной аналитическим путем из (3), и результатов расчета, как видно наблюдается очень хорошее совпадение.

Таблица 2 — Сравнение частоты остаточных колебаний после реконфигурации аппарата

Аналитика (3), Гц	Расчет, Гц
0.246	0.250

Заключение

Таким образом, в данной работе были достигнуты следующие результаты:

- Разработана методика моделирования динамики подводного аппарата в процессе его реконфигурации.
- Обнаружены остаточные колебания после реконфигурации.

Литература

1. Dang, T.; Lapierre, L.; Zapata, R.; Ropars, B.; Gourmelen, G. A Dynamically Reconfigurable Autonomous Underwater Robot for Karst Exploration: Design and Experiment. Sensors 2022, 22, 3379. https://doi.org/10.3390/s22093379.

2. Н.Я. Фабрикант. Аэродинамика Ч. 1. Государственное издательство технико-теоретической литературы. – М., 1949, 628 с.

Информация об авторах

Забелло Константин Константинович, программист, Государственный научный центр Российской Федерации «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики» (ГНЦ РФ ЦНИИ РТК), Россия, 194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 21, k.zabello@rtc.ru, ORCID: 0000-0002-9641-8975

Щур Николай Алексеевич, к.ф.-м.н., математик, ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Россия, 194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 21, n.tschur@rtc.ru, ORCID: 0000-0003-2480-6861

Трёхмерное численное моделирование движущихся рядом подводных аппаратов

А.А. Пожилов, Н.А. Щур
Государственный научный центр Российской Федерации «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики» (ГНЦ РФ ЦНИИ РТК), Санкт-Петербург, Россия, a.pojilov@rtc.ru, n.tschur@rtc.ru

Аннотация
В настоящее время в различных областях всё более актуальным и перспективным становится направление, связанное с групповым управлением аппаратами. При групповом движении важно учитывать, что движущиеся рядом аппараты оказывают друг на друга влияние. Для количественной оценки взаимного влияния аппаратов, в данной работе проведено детальное трёхмерное численное моделирование пары аппаратов цилиндрической формы, движущихся с одинаковой постоянной скоростью на заданном расстоянии друг от друга. Расстояние между аппаратами варьируется от 0.5 D = 30мм, до 12.5 D = 750 мм (D = 60 мм – диаметр аппарата). Для движущихся рядом аппаратов сила сопротивления оказывается тем выше, чем ближе аппараты, увеличение достигает 5% при дистанции 0.5 D. Боковая (сближающая) сила достигает 40% от силы сопротивления для дистанции 0.5 D и снижается при увеличении дистанции. Обнаружено, что разворачивающий момент на близкой дистанции 0.5 D стремится повернуть аппараты носом друг к другу, а при увеличении дистанции до 1 D меняет знак и действует в противоположном направлении. В работе анализируется влияние расчётной сетки и модели турбулентности на получаемые результаты. Согласно результатам расчётов, можно сделать вывод, что базовая расчётная сетка ($y+ \approx 40$) является достаточной для моделирования. Показано, что симметричная и полная постановки задачи дают хорошо совпадающие результаты, поэтому для экономии вычислительных ресурсов расчёты рекомендуется проводить в симметричной постановке. Наибольшая чувствительность к выбору модели турбулентности, сетки и граничных условий наблюдается для значений разворачивающего аппараты момента.

Ключевые слова
Вычислительная гидродинамика, группа аппаратов, групповое движение, автономный необитаемый подводный аппарат (АНПА).

Благодарности
Результаты получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России № 075-00697-24-01 от 03.04.2024 «Алгоритмы группового управления автономными необитаемыми подводными аппаратами в условиях ограниченной пропускной способности гидроакустических каналов связи» (FNRG-2022-0025 1021101316168-7-2.2.2).

Three-dimensional numerical simulation of underwater vehicles moving together

Aleksei A. Pozhilov, Nikolai A. Tschur,
Russian state scientific center for robotics and technical cybernetics, St. Petersburg, Russia, a.pojilov@rtc.ru, n.tschur@rtc.ru

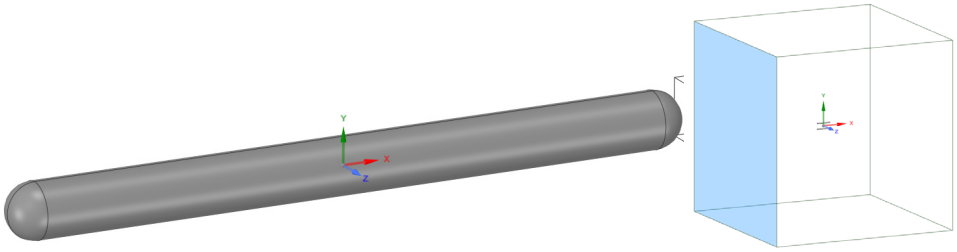
Abstract
Nowadays, group control systems are becoming increasingly relevant and promising in various fields. When moving in a group, it is important to take into account that vehicles moving nearby affect each other. To quantitatively assess the mutual influence of vehicles, a detailed three-dimensional numerical simulation of a pair of cylindrical-shaped devices moving at the same constant speed at a given distance from each other was performed in present study. The distance between the devices varies from 0.5 D = 30mm, to 12.5 D = 750 mm (D = 60 mm is the diameter of the device). The resistance force increases with decreasing distance. For devices moving at a distance of 0.5 D, the resistance force is 5% greater than for devices that are far from each other. The lateral force, that brings devices together, reaches 40% of the resistance force for a distance of 0.5 D and decreases with increasing distance. It was found that the turning moment at a close distance of 0.5 D tends to turn the devices nose to each other, and when the distance is increased to 1 D, it changes sign and acts in the opposite direction. The paper analyzes the influence of the computational mesh and turbulence model on the obtained results. According to the calculation results, it can be concluded that the base computational mesh ($y+ \approx 40$) is sufficient for modeling. It is shown that the symmetric and complete formulations of the problem give well-matching results, therefore, in order to save computational resources, it is recommended to perform calculations in a symmetric formulation. The most sensitive parameter to the choice of the turbulence model, grid and boundary conditions is the turning moment of the device.

Key words
Computational fluid dynamics (CFD), group of devices, group movement, autonomous underwater vehicle (AUV).

Acknowledgements
The work was carried out as the part of the state task of the Russian Ministry of Education and Science from 03.04.2024 № 075-00697-24-01 «Algorithms for group control of autonomous uninhabited underwater vehicles taking into account the limited bandwidth of hydroacoustic communication channels» (FNRG-2022-0025 1021101316168-7-2.2.2).

В настоящее время в ЦНИИ РТК активно развивается методика совместного трёхмерного численного моделирования динамики управляемого подводного аппарата и гидродинамики обтекающей его жидкости, которая используется для разработки и тестирования систем управления подводных аппаратов [1]. Пока эта методика применима только для одиночных аппаратов. В то же время, в различных областях всё более актуальным и перспективным становится направление, связанное с групповым управлением аппаратами [2, 3]. При групповом движении важно учитывать, что движущиеся рядом аппараты оказывают друг на друга влияние.

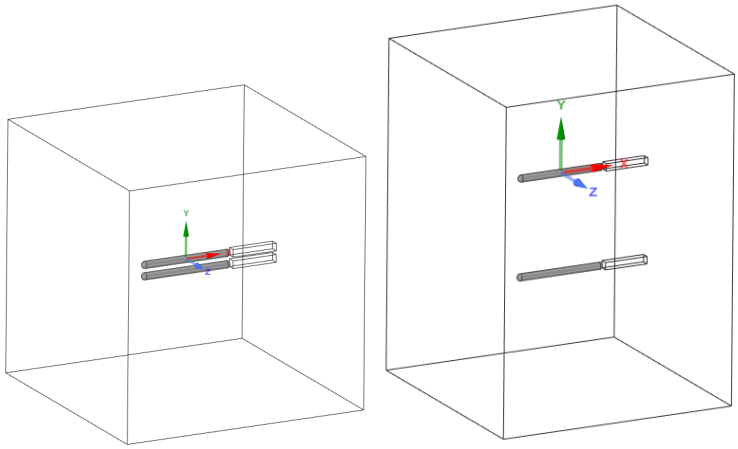
Для количественной оценки взаимного влияния аппаратов, в данной работе проведено детальное трёхмерное численное моделирование пары аппаратов, движущихся с одинаковой постоянной скоростью на заданном расстоянии друг от друга. Аппараты имеют цилиндрическую форму с полусферами на концах, как показано на рисунке 1а. Общая длина аппарата составляет 75 см, а диметр D основной цилиндрической части и полусфер на концах – 6 см. Расчётная область показана на рисунке 1б и представляет собой куб со стороной 100 м, в центре которого находятся два аппарата. Задача решается в связанной с аппаратами системе координат, так на одной из границ (показанной синим цветом) задается условие однородного набегающего потока со скоростью 2 м/с, на выходной границе – условие нулевого относительного давления, а на остальных границах – условие симметрии. Плотность воды задаётся равной 1000 кг/м^3, динамическая вязкость – 0,001 кг/(м·с). Число Рейнольдса составляет примерно Re ≈ $1.2 \cdot 10^5$. Расчёты проводятся в стационарной постановке. Для моделирования турбулентности используются k-omega SST и k-epsilon Realizable модели.



а) **б)**

Рисунок 1 — Геометрия аппарата (а) и расчётная область (б)

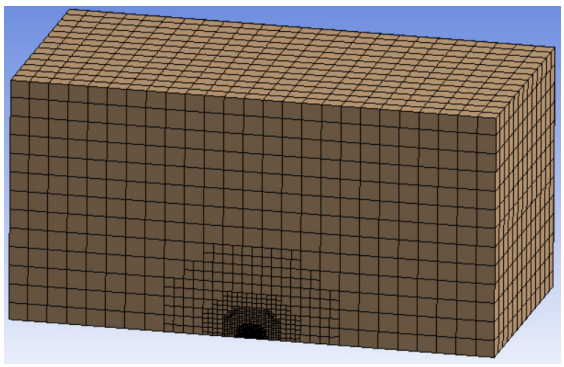
В ходе работы проводятся серии расчётов с варьированием расстояния между аппаратами (от края одного до края второго): от 0.5 D = 30 мм, до 12.5 D = 750 мм. Область рядом с аппаратами проиллюстрирована на рисунке 2 для минимального и максимального расстояния между аппаратами.



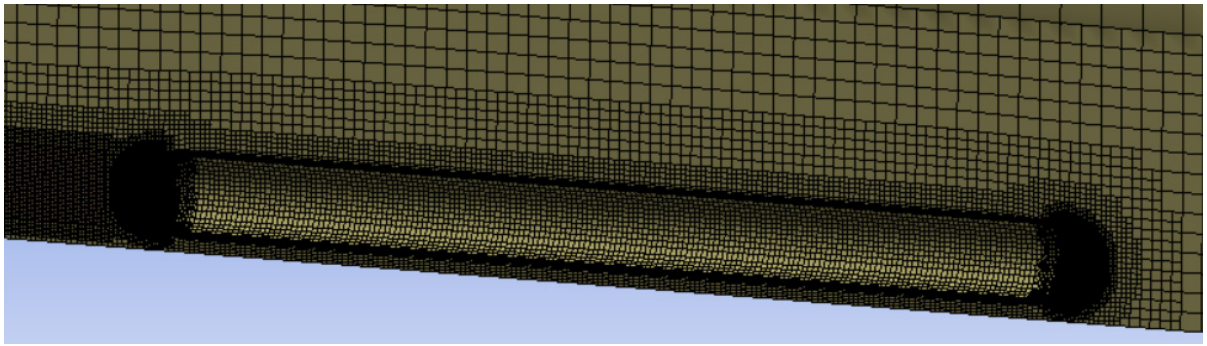
а) **б)**

Рисунок 2 — Область рядом с аппаратами при расстоянии между аппаратами 0.5 D (а) и 12.5 D (б)

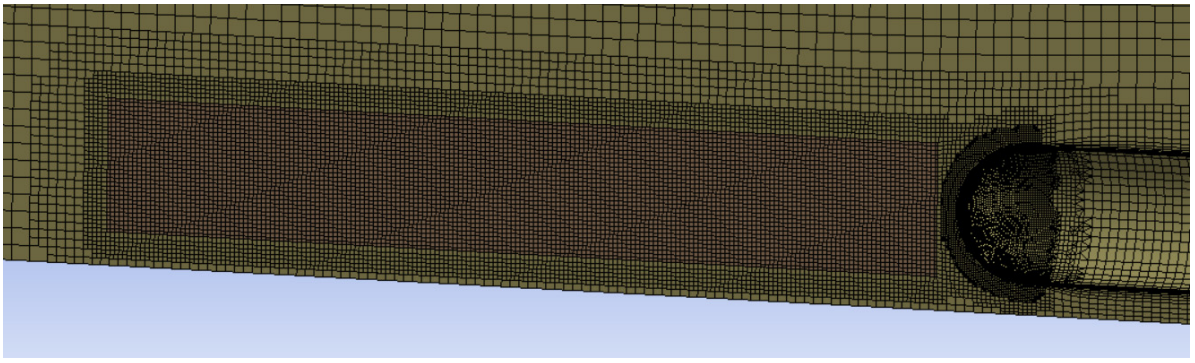
Расчёты проводятся как в полной постановке с двумя аппаратами, так и в симметричной, когда расчётная область в 4 раза меньше и включает в себя только половину одного аппарата. На рисунке 3 проиллюстрирована базовая расчётная сетка для симметричной постановки задачи. Вдали от аппарата используются крупные ячейки размером 4 м, в области около 2 м рядом с аппаратом размер ячеек составляет 8 см. В непосредственной близости с аппаратом используется подробная расчётная сетка с пограничными слоями на его поверхности. Размер ячеек на баковой поверхности аппарата составляет 4 мм, соответственно на диаметр аппарата приходится 15 ячеек, а на окружность – 50 ячеек. На передней и задней поверхностях аппарата размер ячеек составляет 1 мм, а в следе за аппаратом – 2 мм, что соответствует 30-ти ячейкам поперёк следа аппарата.



а)



б)



в)

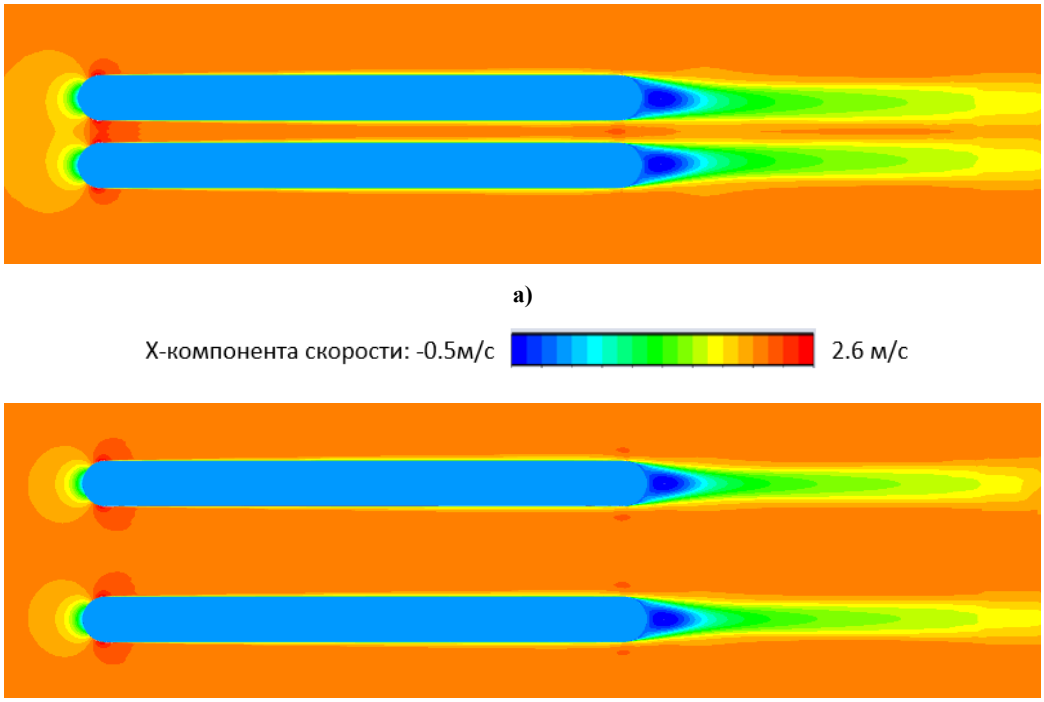
Рисунок 3 — Базовая расчётная сетка для симметричной постановки задачи: а) общий вид; б) вблизи аппарата; в) в следе за аппаратом

Полный список всех расчётных сеток и их параметры приведены в таблице 1. Основные размеры ячеек для мелкой сетки в два раза меньше, а для грубой сетки – в два раза больше, чем для базовой. Для аккуратного разрешения профиля скорости у поверхности аппарата используются сеточные пограничные слои. На базовой сетке, значение безразмерного сеточного параметра y+ примерно равно 1, это означает, что профиль скорости детально разрешается вплоть до вязкого подслоя. Для оценки чувствительности решения к значениям параметра y+, построена также базовая сетка с $y+ \approx 40$, на которой профиль скорости разрешается до области применения пристенных функций и вязкий подслой не прописывается. Также, для сравнения результатов полной и симметричной постановок задачи была построенная базовая сетка для полной расчётной области с двумя аппаратами. Время одного расчёта на 10 ядрах: на базовой сетке – 40 минут, на мелкой – 140 минут.

Таблица 1 — Параметры расчётных сеток

Сетка	Размер элементов, мм			y+	Количество ячеек
	Поверхность аппарата		След		
	Боковая	Передняя/задняя			
Базовая	4	1	2	1	634077
Мелкая	2	0.5	1	1	2377789
Грубая	8	2	4	1	221244
Базовая y+40	4	1	2	40	474775
Базовая для полной постановки	4	1	2	1	2466180

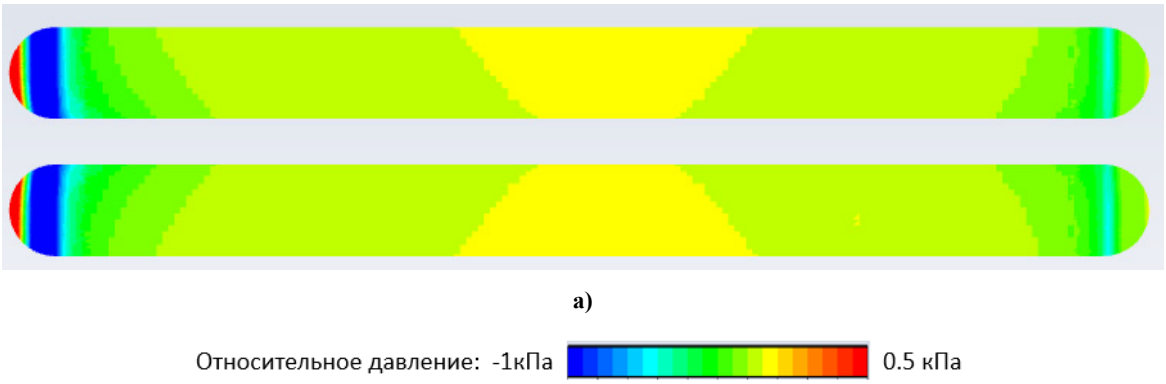
Для иллюстрации получаемого в расчётах течения, на рисунке 4 приведено поле x-компоненты скорости, а на рисунке 5 – поле относительного давления на поверхности аппаратов. По распределению x-компоненты скорости видно, что для дистанции 0.5 D обтекание каждого из аппаратов несимметрично – следы за аппаратами немного стягиваются друг к другу. Более отчётливо несимметричность заметна на распределении давления – видно, что возникает боковая сила, стягивающая аппараты друг к другу.



а)

б)

Рисунок 4 — Поле x-компоненты скорости, расстояние между аппаратами: а) 0.5 D; б) 2 D



а)

б)

Рисунок 5 — Поле относительного давления на поверхности аппаратов, расстояние между аппаратами: а) 0.5 D; б) 2 D

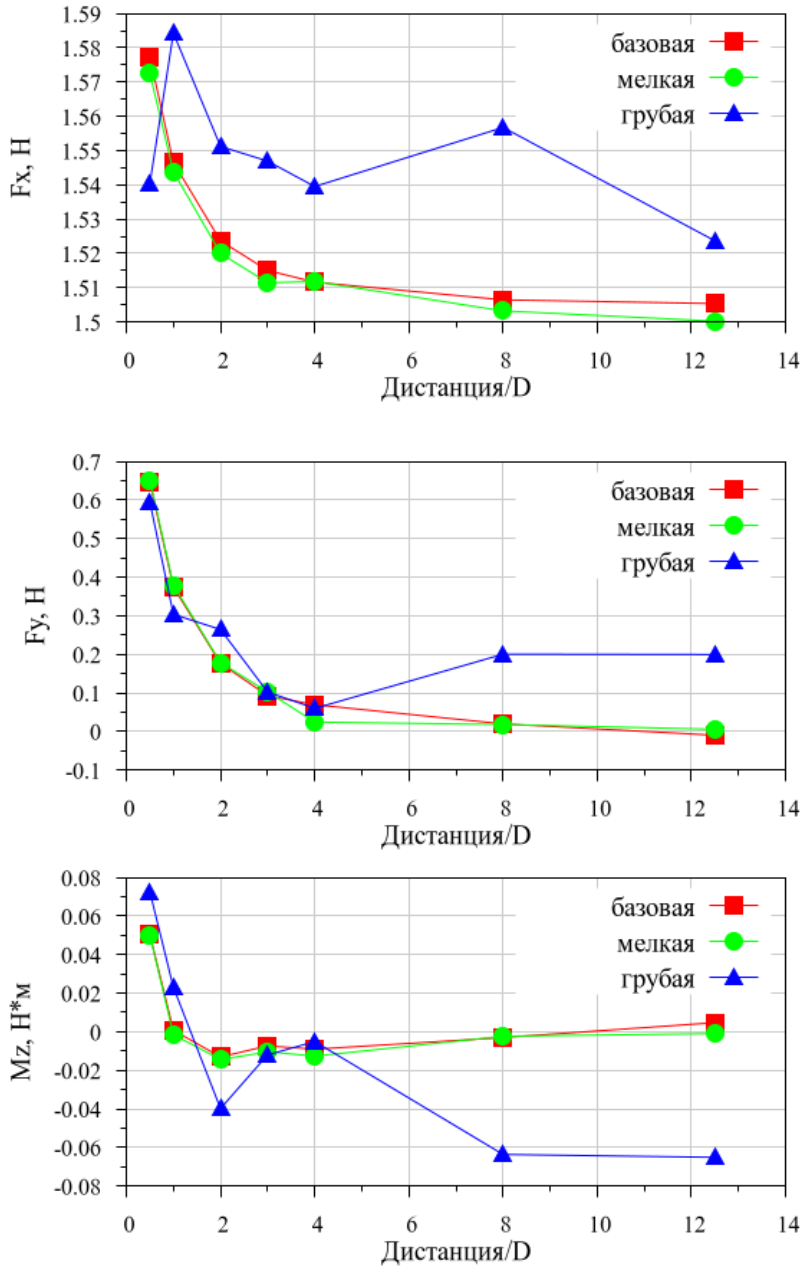


Рисунок 6 — Значения силы сопротивления, боковой силы и разворачивающего момента, полученные на разных расчётных сетках

В результате расчётов на всех сетках были получены значения силы сопротивления Fx, боковой силы Fy и разворачивающего аппараты момента Mz для 7-ми различных расстояний между аппаратами: от 0.5 D = 60 мм, до 12.5 D = 750 мм. На рисунке 6 приводятся полученные на базовой, мелкой и грубой сетках зависимости значений сил и момента от расстояния между аппаратами. По оси абсцисс отложено расстояние от края одного аппарата до края другого, отнесённое к диаметру аппарата D = 60 мм. Видно, что результаты, полученные на базовой и мелкой сетках, хорошо совпадают между собой, а результаты, полученные на грубой сетке –заметно отличаются. Сила сопротивления Fx тем выше, чем ближе аппараты друг к другу. При расстоянии между аппаратами равном 0.5 D сила сопротивления оказывается на 5% больше, чем для аппаратов, движущихся далеко друг от друга. Боковая, сближающая аппараты, сила Fy достигает 40% от силы сопротивления для дистанции 0.5 D между аппаратами и снижается при увеличении дистанции. Разворачивающий аппараты момент Mz стремится повернуть аппараты носом друг к другу при расстоянии между ними равном 0.5 D, а при увеличении расстояния меняет знак и действует в противоположную сторону.

На рисунке 7 приводятся результаты, полученные с использованием двух различных моделей турбулентности, k-epsilon Realizable и k-omega SST, на двух расчётных сетках: базовой с y+ ≈ 1 и базовой с y+ ≈ 40. На сетке с y+ ≈ 40 сила сопротивления Fx почти совпадает для двух моделей турбулентности, а на сетке с y+ ≈ 1 различие составляет около 2.5%. Различие в боковой силе Fy для дистанции 0.5 D достигает 10%. Наибольшее влияние модели турбулентности и сеточного параметра y+ наблюдается на значениях разворачивающего аппараты момента Mz – порядка 30%.

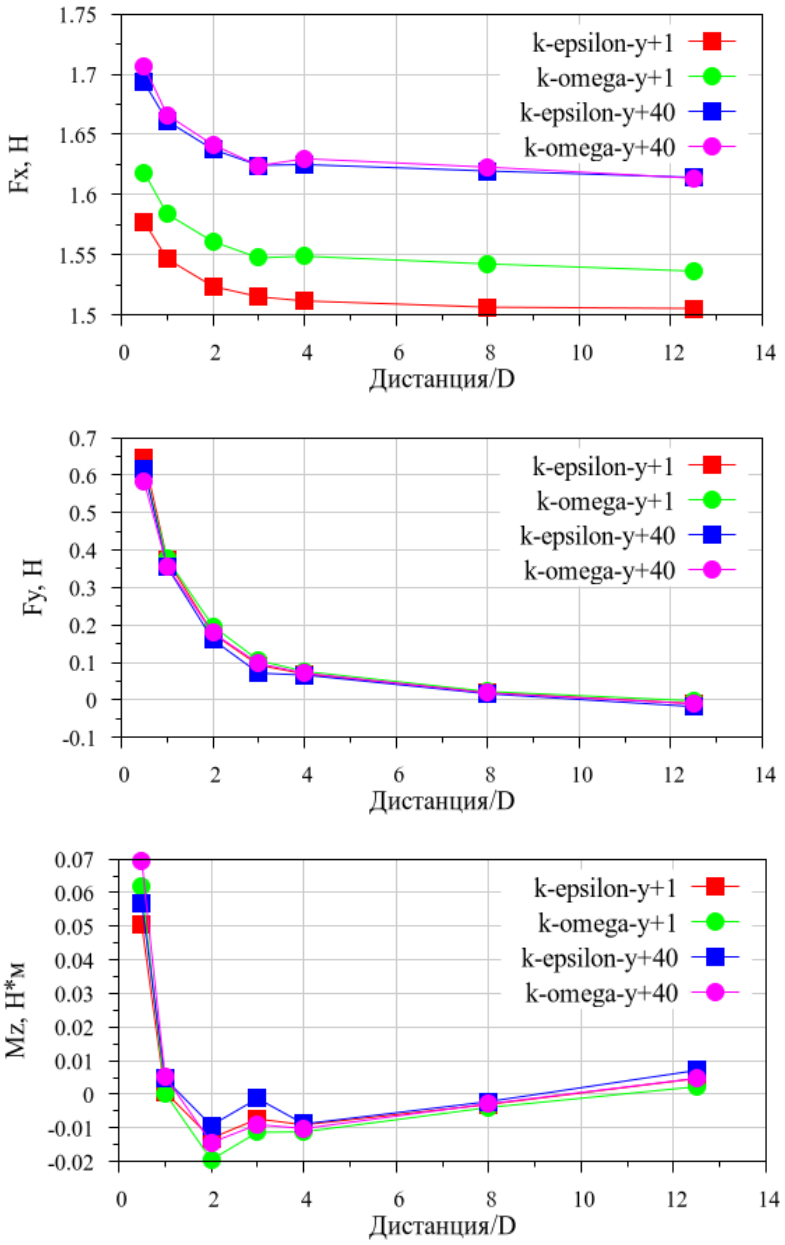


Рисунок 7 — Значения силы сопротивления, боковой силы и разворачивающего момента, полученные при использовании разных моделей турбулентности и значений параметра y+

Сравнение результатов, полученных для полной и симметричной постановок задачи, показано на рисунке 8. Видно, что результаты для полной и симметричной постановок хорошо совпадают, отличие в силе сопротивления Fx и сближающей аппараты силе Fy составляет порядка 0.5%. Наибольшие отличия наблюдаются в значениях момента Mz для дистанции между аппаратами равной 1 D и 3 D.

В настоящей работе проведено детальное трёхмерное численное моделирование пары цилиндрических аппаратов, движущихся с одинаковой постоянной скоростью на заданном расстоянии друг от друга. Расстояние между аппаратами варьируется от 0.5 D = 30мм, до 12.5 D = 750 мм. Для движущихся рядом аппаратов сила сопротивления оказывается тем выше, чем ближе аппараты, увеличение достигает 5% при дистанции 0.5 D. Боковая (сближающая) сила достигает 40% от силы сопротивления для дистанции 0.5 D и снижается при увеличении дистанции. Обнаружено, что разворачивающий момент на близкой дистанции 0.5 D стремится повернуть аппараты носом друг к другу, а при увеличении дистанции до 1 D меняет знак и действует в противоположном направлении. Согласно полученным результатам, базовая расчётная сетка с $y+ \approx 40$ является достаточной для проведения расчётов. Показано, что симметричная и полная постановки задачи дают хорошо совпадающие результаты, поэтому для экономии вычислительных ресурсов расчёты рекомендуется проводить в симметричной постановке. Наибольшая чувствительность к выбору модели турбулентности, сетки и граничных условий наблюдается для значений разворачивающего аппараты момента, и его точное определение является ещё более ресурсоёмкой задачей, чем определение действующих на аппарат сил. В дальнейших работах планируется исследовать силовое воздействие следа от аппарата на движущийся позади аппарат.

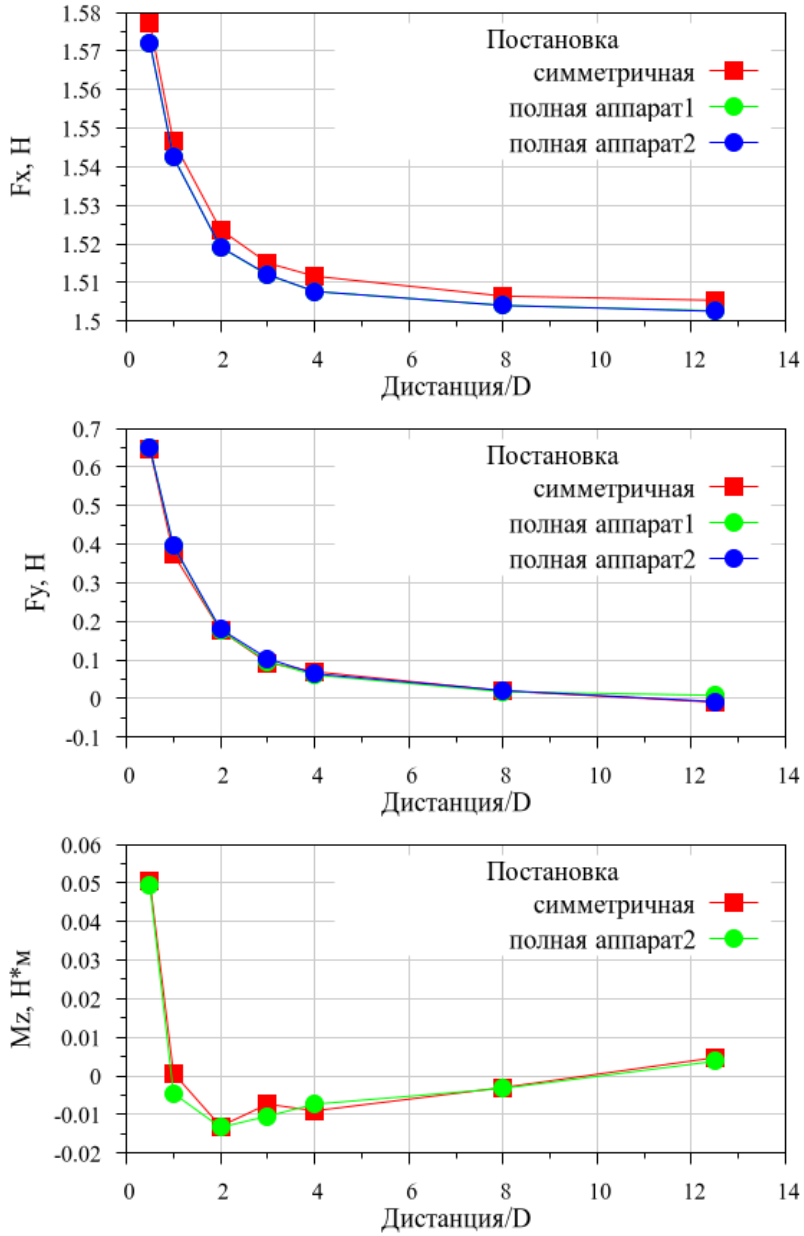


Рисунок 8 — Значения силы сопротивления, боковой силы и разворачивающего момента, полученные для полной и симметричной постановок задачи

Литература

1. Щур Н.А. Применение методов вычислительной гидродинамики для получения характеристик переходных процессов АНПА / Н.А. Щур, С.А. Половко, А.А. Деулин // Робототехника и техническая кибернетика. Санкт-Петербург: ЦНИИ РТК – 2020 – Т. 8, №4. С. 287-295. https://doi.org/10.31776/RTCJ.8405.
2. Scherbatyuk A., Sporyshev M. Comparison of Some Algorithms for Centralized Planning of AUV Group Operation for Local Heterogeneities Survey // Proceedings of the OCEANS 2016 MTS/IEEE Conference, Shanghai, China – 2016 – pp. 1-5. https://doi.org/10.1109/OCEANSAP.2016.7485436.
3. Павин А.М., Инзарцев А.В., Елисеенко Г.Д. Реконфигурируемая распределенная система для группового управления АНПА, Технические проблемы освоения мирового океана – 2017 – Т. 7, с. 263-269.

Информация об авторах

Пожилов Алексей Алексеевич, инженер, Государственный научный центр Российской Федерации «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики» (ГНЦ РФ ЦНИИ РТК), Россия, 194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 21, a.pojilov@rtc.ru, ORCID: 0009-0005-2458-7533

Щур Николай Алексеевич, к.ф.-м.н., математик, ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Россия, 194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 21, n.tschur@rtc.ru, ORCID: 0000-0003-2480-6861

Формирование сценариев действий робототехнических комплексов в виртуальной среде

И.С. Бунар, А.Г. Любимов, И.К. Петушок✉
Государственный научный центр Российской Федерации «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики» (ГНЦ РФ ЦНИИ РТК), Санкт-Петербург, Россия, i.petushok@rtc.ru

Аннотация
Статья посвящена методам формирования сценариев в виртуальной физической среды, реализующимся в виде программного модуля системы проектирования робототехнических комплексов (РТК). Виртуальная среда реализована на отладочно–моделирующим комплексе (ОМК), предназначенном для отладки и отработке конструктивных, функциональных и алгоритмических решений робототехнических комплексов различных типов.

Ключевые слова
Отладочно-моделирующий комплекс, сценарии, функциональное моделирование, поведенческое (имитационное) моделирование, миссия, робототехнический комплекс, группы РТК, технологическая операция (ТОП), модель внешней среды, подводные технические работы, визуализация.

Благодарности
Результаты получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России FNRG-2022-0008 № 075-01595-23-04 «Исследование методов и разработка технологий создания отладочно-моделирующих комплексов для функционального и поведенческого моделирования РТК и групп РТК».

Formation of scenarios for the actions of robotic tools on a debugging and modeling complex

Ilona S. Bunar, Andrey G. Lubimov, Igor K. Petushok✉
Russian state scientific center for robotics and technical cybernetics, St. Petersburg, Russia, i.petushok@rtc.ru

Annotation
The article is devoted to the methods of scenario formation in a virtual physical environment, implemented in the form of a software module for the design system of robotic complexes (RTK). The virtual environment is implemented on a debugging and modeling complex (OMK) designed for debugging and testing constructive, functional and algorithmic solutions of various types of robotic complexes.

Key words
Debugging and modeling complex, scenarios, functional modeling, behavioral (simulation) modeling, mission, robotic complex, RTK groups, technological operation (TOP), environmental model, underwater technical work, visualization.

Acknowledgements
The results were obtained as part of the fulfillment of the state task of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation FNRG-2022-0008 No. 075-01595-23-04 «Research of methods and development of technologies for creating debugging and modeling complexes for functional and behavioral modeling of RTK and RTK groups».

Разработка РТК для выполнения сложных комплексных работ в условиях неполноты информации и слабо структурированной модели внешней обстановки вызывает необходимость применения специальных инструментариев и IT-технологий.

Рассматриваемые материалы приводятся относительно и на примерах морских РТК, предназначенных для выполнения подводно-технических работ. Однако, предлагаемые принципы и подходы к созданию и функционированию РТК во многом применимы и к другим группам предметных областей, например, наземные РТК, воздушные РТК.

В качестве комплексного инструментария для разработки РТК предлагается отладочно-моделирующий комплекс.

Задачи для моделирования на ОМК условно можно разделить на классы по уровням представления предметной области:

- описание модели применения (МП) РТК и групп РТК;
- анализ МП РТК и формирование требований к РТК, то есть комплекса задач, функций и свойств;

– формирование облика и состава РТК с учётом возможностей для реализации модели применения, то есть требований по назначению;
– формирование и отработка алгоритмов функционирования РТК при выполнении задач;
– комплексирование алгоритмов и формирование имитационной модели РТК;
– исследование различных вариантов сценариев модели поведения РТК и выбор наиболее приемлемых «рабочих» вариантов для дальнейшей проработки и технического проектирования РТК.

Остановимся подробнее на формировании модели применения РТК и групп РТК. Модель применения РТК должна содержать в себе комплекс действий различной сложности, необходимый для выполнения подводно-технических работ, а также возможные последовательности таких действий.

Изначально «модель применения» РТК формулируется Заказчиком в ТЗ. Исполнитель (разработчик) подробно раскрывает модель применения, декомпозирует её. При этом выделяются: целевые установки (общие и частные); типовые комплексные и частные задачи; функции и свойства создаваемого РТК.

Общие и частные цели реализуются посредством набора задач. Примерами задач РТК могут являться: навигационные задачи; перемещение по заданному маршруту; распознавание объектов во внешней среде;

Для выполнения задач РТК должен обладать необходимыми функциями и свойствами.

Функциями РТК, как изделия, будем считать способность выполнять определённые действия. Функции обеспечиваются выполнением соответствующего алгоритма на определённом оборудовании, то есть на аппаратных и технических средствах РТК.

Примеры функций РТК: определение своего места положения; определение глубины погружения; определение отстояния от грунта; определение параметров внешней среды; передвижение в пространстве; связь с командным пунктом;

Свойства РТК обеспечиваются конструкцией, материалами и характеризуются качественными показателями. Примерами свойств РТК являются: прочность; плавучесть; собственные физические поля; гидродинамические свойства.

В качестве формата описания модели применения РТК целесообразно использовать сценарии.

Наиболее полное описание возможных полезных целенаправленных действий, которые способен выполнять РТК представляется в виде «общего сценария», на базе которого можно задавать конкретную миссию РТК (в частности АНПА). Общий сценарий должен учитывать и содержать все возможные задачи, функции и свойства РТК.

Общий сценарий миссии АНПА целесообразно декомпозировать на логически завершённые частные типовые сценарии, такие как:
– «переход АНПА по заданному маршруту»;
– «поисковые действия в заданном районе»;
– «обследование подводного объекта»;
– «выполнение работ и операций с подводным объектом»;
– «возвращение АНПА к судну базирования».

Такие частные типовые сценарии представляют целевые установки для этапов миссии, их можно назвать «этапными» сценариями.

«Сценарий миссии» формируется из частных типовых сценариев. Типовой сценарий представляет собой план (программу) выполнения определенного набора типовых операций (ТОП), приводящих к исполнению отдельной смысловой части миссии. Типовой сценарий оформляется в виде законченного программного модуля.

Каждый типовой сценарий имеет свой набор параметров, значения которых необходимо задавать при планировании миссии. Из набора типовых сценариев формируется библиотека типовых сценариев. Используя библиотеку типовых сценариев, можно составлять различные миссии (задания) для РТК (АНПА).

Внутри частных типовых сценариев целесообразно выделить часто востребованные типовые технологические операции (ТОПы).

Технологической операцией (ТОП) будем называть законченный набор (фрейм) действий, который выполняет определенную задачу, функцию, операцию и позволяет описать логику функционирования РТК, не вдаваясь в излишние детали. ТОП представляет собой вычислительный алгоритм или процедуру управления определённым оборудованием, но по отношению к общей логике функционирования системы (РТК), ТОП является неделимой (атомарной) сущностью.

ТОП всегда относятся к определённому оборудованию («модуля устройства»). Условно оборудование можно разделить по уровням:
– комплекс (навигационный комплекс, ДРК, СТЗ, ГАК и т.д.);
– агрегат (лаг ДП, ГБО, ИНС, эхолот, видеокамера и т.д.);
– устройство (электродвигатель, антенна, электроаккумулятор, прожектор, альтиметр и т.д.).

Для алгоритмического обеспечения АНПА необходимо формировать и разрабатывать иерархическую структуру ТОПов.

В зависимости от уровня представления, состава задействованного оборудования и сложности алгоритма типовые технологические операции могут классифицироваться следующим образом:

Операционные типовые технологические операции (ОТОП), соответствуют уровню задач РТК. В ОТОП задействованы несколько групп оборудования РТК.

Например, в ОТОП «Перемещение по заданному маршруту» задействованы: навигационный комплекс (НК); движительно-рулевой комплекс (ДРК); энергетический комплекс и другие.

Комплексные типовые технологические операции (КТОП), соответствуют уровню функций РТК. В КТОП задействован отдельный комплекс оборудования РТК.

Например, в КТОП «Определение своего места положения» задействован навигационный комплекс (НК).

Типовые технологические операции для устройств нижнего базового уровня декомпозиции состава и оборудования РТК, то есть неделимых элементов ТОП-Э.

Для всех ТОП следует создавать стандартный формат, в который должны входить следующие элементарные действия:

- подача питания и включение оборудования;
- выключение;
- тестирование, проверка оборудования на исправность;
- переключение оборудования на различные режимы;
- изменение значений параметров, уставок (например, изменение значения уставки частоты оборотов или направления вращения движителей в ДРК).

Для каждой ТОП должен существовать фиксированный набор команд, поступающих с «верхнего» уровня (от алгоритма сценария). То есть, на вход каждой ТОП должна поступать команда с заданными значениями параметров.

Формат команды должен соответствовать формату ТОП.

Для каждой команды ТОП формируется ответ, то есть информация о результатах выполнения данной команды, выполненным действиям и состоянием данного устройства (оборудования). Эта информация передаётся для обработки в вышестоящий уровень алгоритма системы управления, то есть в алгоритм сценария. Кроме того, ответом может быть сообщение о невыполнении данной команды или сообщение об аварийном состоянии данного устройства (оборудования).

Таким образом, частные сценарии в значительной мере можно формировать из набора ТОПов.

Некоторые отдельные типовые сценарии задаются при планировании миссии «по умолчанию» и запускаются в случае наступления какого-либо события.

Например, при возникновении аварийной ситуации должен запуститься типовой сценарий отработки аварийной ситуации («Аварийный сценарий»).

Другой пример, при выполнении частного сценария «Переход АНПА по заданному маршруту» при необходимости запускается типовой сценарий «Обход подводного препятствия».

Таким образом, частный сценарий представляет собой комплекс алгоритмов, где «операндами», то есть данными являются ТОПы различных уровней.

По аналогичным принципам строится «сценарий миссии», который представляет собой комплекс алгоритмов, где «операндами», данными являются частные сценарии.

При запуске (инициализации) типового частного сценария автоматически подключается необходимый набор типовых операций (ТОПов), которые работают в рамках этого сценария.

Формирование модели корректной целевой обстановки (ситуации) в реальном маштабе времени, является важным критерием успешности действий РТК и групп РТК.

Целями моделирования внешней обстановки и физической среды и являются: получение наглядной картины движения и функционирования РТК в процессе выполнения миссии; отладка алгоритмов управления РТК; решение задач навигации, распознавания объектов и взаимодействия с ними.

Для решения вопросов отладки и тестирования программных компонентов информационно-управляющих систем производится сопряжение имитационной модели РТК с имитаторами бортового оборудования и моделью внешней среды [1].

В качестве общего принципа планирования действий РТК и групп РТК рассматривается иерархия «миссия-сценарий-технологические операции (ТОП)» [2].

Формирование миссии выполняется путем задания последовательности типовых частных сценариев.

Такой подход позволяет создать формальный аппарат единообразного высокоуровневого описания организации и самоорганизации функционирования РТК [2].

Среда разработки, должна быть кроссплатформенной и решать следующие задачи [3]:

- задание и моделирование физических и природно-климатических параметров среды функционирования РТК;
- автоматическое формирование алгоритмов действий РТК в условиях нечёткой и неполной исходной информации;
- моделирование внешних объектов и взаимодействие с ними.

Пользователи предлагаемого отладочно-моделирующего комплекса (ОМК) должны иметь возможность пошагового формирования функционального и поведенческого моделирования РТК и групп РТК, а также получения на выходе результатов расчетов, моделей и алгоритмов поведения.

После входа на ОМК производится моделирование обстановки, в которой должны действовать РТК.

Сначала осуществляется выбор локации, как из представленного набора, так и выбор карт по названию или координатам (рис. 1).

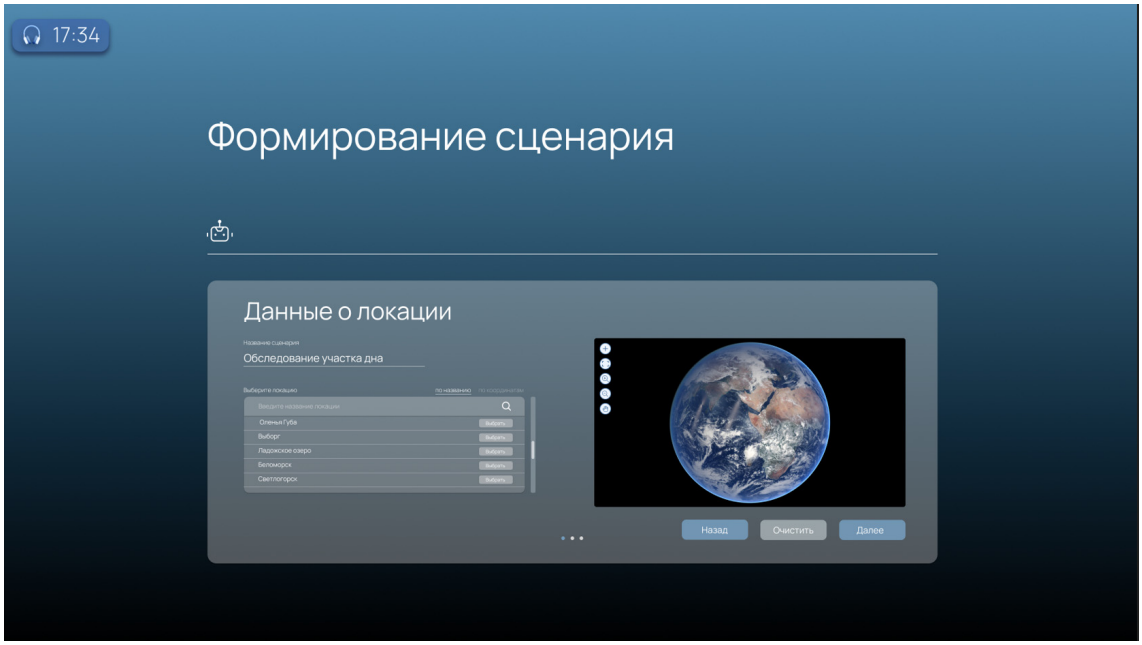


Рисунок 11 — Выбор локации

Далее осуществляется выбор одного или нескольких РТК из набора ранее разработанных вариантов. При этом представляется структура РТК, информация о функциях и технических характеристиках РТК, а также возможность обзора 3D модели выбранного РТК (рис. 2).

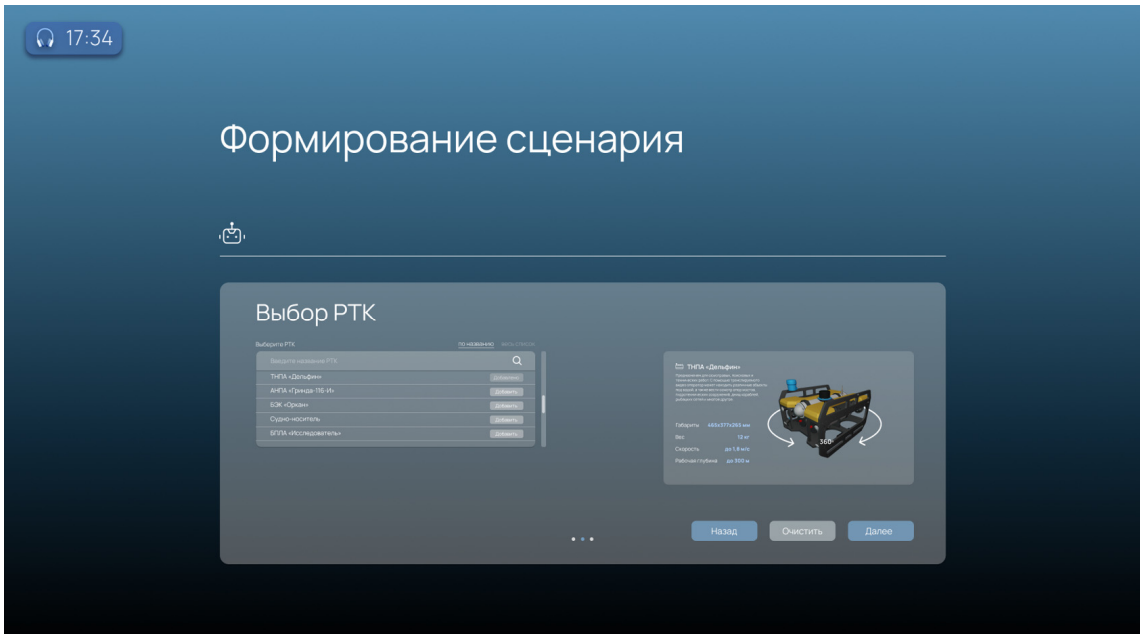


Рисунок 2 — Выбор робототехнического средства

Затем отображается конфигуратор миссии, с помощью которого моделируется конкретная обстановка и формируется сценарий миссии (рис. 3):

– на отдельной панели в сопряжении с морской картой могут задаваться координаты текущего положения каждого РТК, а также скорость, направление, глубина погружения и положение относительно дна, отображаются важные для создания маршрутов РТК специальные маркеры;

– на отдельной панели задается дата, время, параметры внешней среды и погодные условия.

Рисунок 3 — Экран конфигуратора

В структуре создаваемого ОМК содержится широкий комплекс средств моделирования, конфигурирования, отработки и анализа всех элементов оборудования и системы управления РТК. Для возможно более полной отработки всех режимов управления должны быть реализованы универсальные интерфейсы как с имитаторами пультов/постов управления, так и с программно-аппаратными средствами виртуального полигона [3].

Процесс формирования сценариев действий РТК можно разделить на следующие стадии.

1. В соответствии с моделью применения РТК сформулировать максимально подробное описание обобщённого сценария функционирования, который учитывает возможные варианты выполнения миссий РТК.
2. В обобщённом сценарии функционирования РТК выделить фрагменты, характерные для различных вариантов выполнения миссий РТК. Сформировать набор типовых частных сценариев: «переход»; «поисковые действия»; «обследование объекта»; «выполнение работ»; «возвращение». Частные сценарии соответствуют задачам РТК.
3. На основе анализа сценариев сформировать требования к РТК, то есть определить функции, операции и свойства РТК, необходимые для выполнения комплекса задач.

Примеры функций РТК: движение и пространственное маневрирование; определение места нахождения; измерение параметров внешней среды; получение информации о внешних объектах; функция связи с командным пунктом и другими РТК: функция энергообеспечения и другие функции.

4. В соответствии с задачами, функциями, операциями и свойствами РТК сформировать облик и состав РТК.

Пример состава РТК (АНПА): ДРК; НК; измерители параметров внешней среды; ГБО; ГКО; ЭМИ; СТЗ; система связи (ГАС, радиосвязь); блоки АБ; манипуляторный комплекс; другое оборудование.

5. Разработка частных алгоритмов функционирования для всех компонентов РТК при выполнении задач и функций.
6. Комплексирование частных алгоритмов компонентов РТК и формирование общей имитационной модели РТК.
7. Исследование на общей имитационной модели РТК различных вариантов сценариев поведения РТК путём подбора значений параметров и характеристик оборудования (скорость и траектории движения, дальность обнаружения объектов, энергозапас, массогабаритные характеристики и другие). Выбор наиболее приемлемых «рабочих» вариантов сценариев, состава, комплектации и характеристик РТК для дальнейшей разработки и технического проектирования РТК.

Технологии создания и применения отладочно-моделирующего комплекса позволят выработать единый комплексный подход при разработки новых РТК. При этом сокращаются затраты на отладку, тестирование и подготовку персонала. Появляются возможности вносить конструктивные изменения в ходе разработки, а также производить их валидацию и верификацию на ранних стадиях создания РТК.

Литература

1. Е.К. Игнатиади, И.К. Петушок Концепция моделирования внешней среды для морских робототехнических комплексов// Труды 32-й Международной научно-технической конференции «ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ РОБОТОТЕХНИКА», Санкт-Петербург: ЦНИИ РТК, 2021. С. 292–296.

2. Смирнова Е.Ю., Спасский Б.А. Организация супервизорного управления в сценариях экстремальной робототехники // Робототехника и техническая кибернетика. 2020. Т. 8, № 4. С. 245–258.
3. Исследование методов и разработка технологий создания отладочно-моделирующих комплексов для функционального и поведенческого моделирования РТК и групп РТК. // Отчет о НИР. рук. Е.К. Игнатиади. СПб 2023 с.

Информация об авторах

Бунар Илона Сергеевна, инженер, Государственный научный центр Российской Федерации «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики» (ГНЦ РФ ЦНИИ РТК), Россия, Санкт-Петербург, 194064, Тихорецкий пр., д. 21, i.bunar@rtc.ru

Любимов Андрей Геннадьевич, к.т.н., главный специалист, ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Россия, Санкт-Петербург, 194064, Тихорецкий пр., д. 21, lubimov@rtc.ru

Петушок Игорь Константинович, к.воен.н., начальник лаборатории, ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Россия, Санкт-Петербург, 194064, Тихорецкий пр., д. 21, i.petushok@rtc.ru

Исследование влияния особенностей аддитивного производства пластиковых элементов конструкции на ресурс роборыбы

Г.В. Казанцев
Государственный научный центр Российской Федерации «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики» (ГНЦ РФ ЦНИИ РТК), Санкт-Петербург, Россия, g.kazancev@rtc.ru

Аннотация
Статья относится к развитию аддитивных технологий, которые позволяют в сжатые сроки создавать детали сложной геометрии из пластмассы с почти нулевыми отходами для прототипов робототехнических комплексов, в частности, роборыбы. От способа изготовления детали зависят прочность и долговечность подвижной части хвоста роборыбы. Повышение ресурса позволит снизить затраты на обслуживание и ремонт, а также увеличить продолжительность работы роборыбы в различных условиях. В данной статье описаны особенности характера накопления разрушений подвижных элементов хвоста роборыбы при циклических нагрузках, изготовленных с применением аддитивных технологий.

Ключевые слова
Аддитивное производство, изготовление послойным наплавлением, 3D печать, метод конечных элементов, долговечность пластиковых деталей, робототехника.

Благодарности
Результаты получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России №075-00697-24-00 от 27.12.2023 «Исследование путей создания и областей возможного применения биоморфных подводных роботов» (FNRG-2022-0013 1021060307689-7-1.2.1;2.2.2).

Investigation of the influence of the features of additive manufacturing of plastic structural elements on the resource of the fishlike robot

Georgy V. Kazantsev
Russian state scientific center for robotics and technical cybernetics, St. Petersburg, Russia, g.kazancev@rtc.ru

Abstract
The article refers to the development of additive technologies that make it possible in a short time to create parts of complex geometry from plastic with almost zero waste for prototypes of robotic complexes, in particular robot blocks. The strength and durability of the movable part of the tail of the robot fish depend on the method of manufacturing the part. Increasing the resource will reduce the cost of maintenance and repair, as well as increase the duration of operation of the robot fish in various conditions. In this paper, the features of the nature of the accumulation of destruction of the movable elements of the tail of a robot fish under cyclic loads manufactured using additive technologies are investigated.

Key words
Additive manufacturing, fused deposition modeling, 3d printing, finite element method, durability of plastic parts, robotics.

Acknowledgements
The work was carried out as the part of the state task of the Russian Ministry of Education and Science for 2024 №075-00697-24-00 «Investigation of ways to create and areas of possible application of biomorphic underwater robots» (FNRG-2022-0013 1021060307689-7-1.2.1;2.2.2).

Введение

В процессе изготовления деталей из полимерных материалов возникают остаточные напряжения, которые вызваны неравномерным или слишком быстрым охлаждением материала. Величина этих напряжений является причиной выраженных искажений формы особенно для тонкостенных элементов, а также может приводить к образованию трещин, напрямую влияющих на усталостные характеристики, прочность и долговечность. В связи с тем, что большое количество параметров влияет на процесс аддитивного производства, для натурной отработки с целью минимизации остаточных напряжений, деформаций и повышения ресурса требуется большое количество образцов, что затратно по времени и стоимости. Вследствие этого теоретическое

исследование процесса аддитивного производства и измерение этих характеристик путем выполнения численного моделирования является необходимым требованием для сокращения издержек при проектировании детали.

Биоморфный рыбоподобный движитель

Одно из направлений робототехники представляет собой поиск новых решений по созданию биоморфных роботов. В рамках НИОКР в ЦНИИ РТК разрабатывался прототип мобильной робототехнической платформы роборыбы, особенность которой заключалась в способе передвижения с помощью подвижного хвоста [1]. Объектом исследования является биоморфный движитель роборыбы (см. рис. 1), который изготовлен из ABS пластика и приводится в движение с помощью шагового двигателя. Принцип работы заключается в передаче вращательного момента коническими шестерням от двигателя к цепочке косозубых зубчатых колес, расположенных в четыре ряда. В процессе испытаний и отладки возникла необходимость исследования ресурса подвижной части движителя, а именно влияние формоизменений в процессе изготовления деталей.

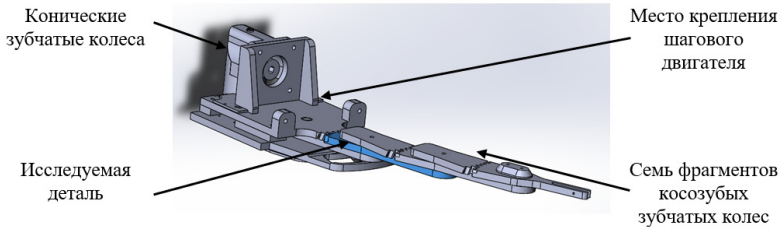


Рисунок 1 — Биоморфный движитель роборыбы

Разработка модели детали роборыбы с учетом технологической наследственности

Разработка элементарного образца обусловлена отработкой моделирования процесса печати в программной среде. Наибольшему механическому воздействию в ходе эксплуатации роборыбы подвержены области резких изменений формы упругого тела и зонах контакта деталей. Исследуемая деталь роборыбы имеет несколько подобных областей: квадратное отверстие для фиксации последующих частей хвоста, круглое отверстие и косозубую передачу, находящуюся со стороны круглого отверстия. Такие области являются концентраторами напряжений и представляют особый интерес для исследования циклического воздействия, так как создают наиболее благоприятные условия для роста трещин и последующего разрушения. В качестве модели элементарного образца используется прямоугольный параллелепипед с габаритными размерами (ШхДхВ) 20х60х8 мм и сквозным круглым отверстием диаметром 10 мм.

Быстрое прототипирование

Изготовление послойным наплавлением (FDM) — один из наиболее широко используемых процессов аддитивного производства для изготовления прототипов и функциональных деталей из инженерных пластиков. Этот метод основан на том, что термопластичная полимерная нить подается в экструзионную головку 3D-принтера, в которой нагревается до вязкотекучего состояния и выдавливается через сопло по заданной траектории для нанесения слоев на рабочую платформу для выращивания изделия непосредственно из цифровой модели детали.

Процесс наплавления материала

Для задач теплопроводности при исследовании высокоинтенсивных нестационарных процессов при печати необходимо учитывать, что теплота распространяется хоть и с очень большой, но конечной скоростью, поэтому необходимо использовать дифференциальное уравнение нестационарной теплопроводности в изотропной упруго-деформируемой среде. Задача теплопроводности, наряду с граничными условиями первого рода (условиями Дирихле), также включает в себя определение граничных условий второго рода (условия Неймана), а также граничных условий третьего рода (условия Коши). Граничные условия второго рода задают величину теплового потока через границу области. Математически выражаются как задание значения нормальной производной температуры на границе области. Граничные условия третьего рода объединяют условия первого и второго рода, задавая линейную комбинацию температуры и ее нормальной производной на границе области, и описывают теплообмен между телом и окружающей средой [2].

Моделирование процесса изготовления детали роборыбы

Основными целями численного моделирования для 3Д печати является прогнозирование температурного поля и остаточных напряжений в детали и ее поведения. Численное моделирование процесса печати можно разделить на два типа, отличающихся своей точностью: моделирование на уровне процесса с высокой точность, где рассматривается печать одного или нескольких слоев и моделирование на уровне детали с меньшей

степенью точности, где рассматривается одна или несколько деталей целиком. Детальное моделирование на уровне процесса выполняется с использованием небольшого приращения времени и мелкой сетки, а также как минимум с одним элементом на толщину печатного слоя и несколькими элементами в зоне действия, где происходит плавление материала. Моделирование на уровне детали выполняется путем соответствующего усреднения (объединения) временной последовательности событий и использования более грубых сеток с целью уменьшения времени расчетов. Анализ решения задач теплопроводности позволяет выявить наибольшие изменения температуры и как следствие наибольшие остаточные напряжения и деформации внутри изделия. Для моделирования процесса аддитивного производства сначала анализируется тепловые нагрузки, возникающие при печати детали, а затем проводится механический анализ, основанный на данных температурного поля, полученных в результате термического анализа.

Для моделирования задач теплопроводности, когда линейные размеры конечных элементов сетки аппроксимируют масштабы теплового источника, диссипация энергии источника может быть произведена внутри объема в соответствии с принципами распределения энергии, описанными в теории Голдака [3].

На примере программного обеспечения Abaqus CAE Additive Manufacturing [3] рассмотрим процесс температурных исследований для элементарного образца. Особенность работы используемого плагина (от англ. plug-in) заключается в возможности создания серии событий, которая определяет начальную и конечную точки сегментов пути. Каждая строка данных состоит из пяти полей для исходных данных: поле времени, три поля координат в глобальной системе координат и мощности принтера для сегмента, запущенного событием. Для автоматизации этого процесса используется скрипт, написанный на языке Python, который создает две серии событий с заданными параметрами. Время изготовления образца в программной среде сопоставимо с временем изготовления натурного образца, так как работа плагина и 3Д принтера основываются на одном и том же G-code. Причем преобразование G-code в серию событий не меняет временные характеристики расчета.

В результате затраченное время на выполнение расчета для выбранной детали роборыбы составило 313 секунд, в то время как печать на 3Д принтере заняла бы 831 секунду. Были получены характеристики температурного поля и поля напряжений ежесекундно (см. рис. 2), а также формоизменения детали после ее остывания.

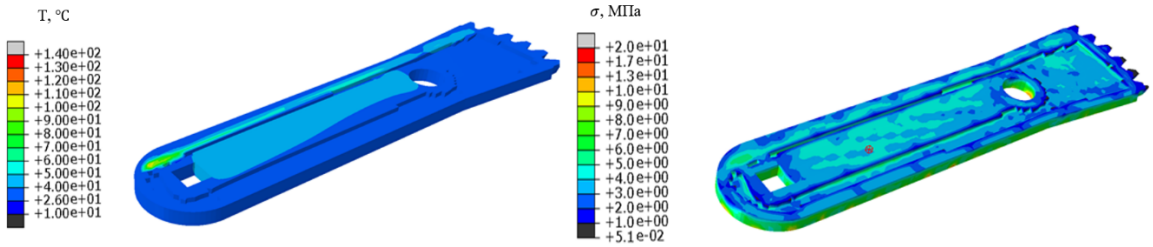


Рисунок 2 — Поле распределений температур и напряжений в процессе изготовления детали

Дефекты печати, например, трещины возникают при условии, если материал обладает малой пластичностью и, если внутренние напряжения превзойдут значение предела прочности выбранного материала. Если же материал достаточно пластичен, то вместо трещин, мы увидим такие нежелательные процессы, как усадка и коробление. Исходя из полученных результатов можно предусмотреть наиболее подверженные дефектам области детали. Численное моделирование выполнялось с использованием процессора Intel Core 12-ого поколения, 16 физических ядер. Прочностные характеристики получаемой детали намного быстрей исследовать с помощью численного моделирования, так как процесс затраченное время на расчеты в 3 раза меньше, чем процесс печати на 3Д принтере (см. табл. 1).

Таблица 1 — Временные характеристики расчетов

Задача моделирования	Затраченное на выполнение расчета время, с.	Печать детали, с.	Охлаждение детали, с	Общее время моделируемого процесса, с.	Число итераций, шт.
Элементарный образец					
Распределения температур	42	139	61	200	200
Изменения напряжений	53	139	61	200	200
Деталь роборыбы					
Распределения температур	303	831	69	900	900
Изменения напряжений	312	831	69	900	900

Влияние аддитивного производства на долговечность изделия

Для учета полученных формоизменений было проведено численное моделирование движений хвоста рыбы на частоте 1 Гц. Моделирование в одинаковых условиях работы выполнялось для двух деталей в составе общей конечно-элементной модели хвоста рооборыбы: для детали с формоизменениями и для детали, изготовленной из изотропного материала. В ходе анализа полученных данных был выбран конечный элемент, испытывающий наибольшие нагрузки. Далее с помощью кривой усталостной прочности для ABS пластика определяется количество циклов до разрушения [4]. Исходя из полученных данных можно сделать вывод о том, что способ изготовления FDM-печатью влияет на усталостные характеристики и снижает ресурс роборыбы на 32,5% по сравнению с изотропной деталью (см. табл. 2).

Таблица 2 — Ресурс роборыбы

Описание детали	Максимальное напряжение, МПа	Количество циклов, шт.
Деталь, изготовленная методом послойного наплавления	16,29	776
Деталь, изготовленная из изотропного материала	15,03	1150

Изучение прочностных характеристик детали изготовленной методом послойного наплавления детали позволит предсказывать наиболее склонные к разрушениям области при циклическом нагружении на этапе проектирования механических узлов робота.

Однако, чтобы точно предсказать поведение детали при циклическом нагружении, необходимо учитывать анизотропию свойств материала, направление движения экструдера, параметры печати, условия окружающей среды.

Литература

1. Научно-исследовательская и опытно-конструкторская работа / Исследование путей создания и областей возможного применения биоморфных подводных роботов // РЕГ. № НИОКТР 122022200371-0.– 2023.

2. Вычислительная механика деформируемого твердого тела. Задачи теплопроводности и теории упругости: учеб. пособие / А. И. Боровков [и др.]. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2019. – 162 с.

3. Документация Abaqus CAE [сайт] — URL: abaqusdocs.eait.uq.edu.au/v6.11/index.html (дата обращения: 12.10.2024). Режим доступа: свободный.

4. Кузьмин А.А., Яблокова М.А. Выбор допускаемых напряжений при расчете на прочность деталей из пластмасс // Современные наукоемкие технологии. – 2016. – № 8-2. – С. 242-246.

Информация об авторе

Казанцев Георгий Викторович, инженер, Государственный научный центр Российской Федерации «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики» (ГНЦ РФ ЦНИИ РТК), Россия, Санкт-Петербург, 194064, Тихорецкий пр., д. 21, g.kazancev@rtc.ru

Обоснование архитектурного облика системы группового управления роботами спасателями

Е.К. Игнатиади[1], П.К. Шубин[1]✉, М.В. Кулешова[1], Е.В. Павлов[2]
[1]Государственный научный центр Российской Федерации «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики» (ГНЦ РФ ЦНИИ РТК), Санкт-Петербург, Россия, shubin@rtc.ru
[2]Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий» (ФГБУ ВНИИПО МЧС России), г. Балашиха, Московская область, Россия, pavlov-vp@mail.ru

Аннотация
В современных условиях ведения боевых действий (БД) высокой интенсивности в локальных и глобальных конфликтах, борьбы с терроризмом и ликвидации разнородных чрезвычайных ситуаций (ЧС), рост числа которых наблюдается в последнее время, кратно возросло значение высокоточной навигации, мониторинга обстановки, целеуказания, связи и управления. Решение задачи оперативного управления особенно актуально применительно к групповому управлению интеллектуальными роботами (ГУР), функционирующими автономно в условиях сложной, недетерминированной, динамической среды, с учетом ограниченности знаний каждого робота о состоянии и непредсказуемой динамике внешней среды. Обоснование архитектурного облика системы группового управления роботами (СГУР) выполнено применительно к реализации проекта по разработке и созданию наземного роботизированного комплекса (НРК), как наращиваемой группы беспилотных универсальных спасательных средств (УСС) смешанного базирования «земля-море-воздух», амфибийного типа, имеющих высокую степень автономности, автоматизации и проходимости для поисково-спасательных операций (ПСО) в экстремальных условиях Арктики и Крайнего Севера.

Ключевые слова
Роботизированный комплекс, групповое управление, оптимизация.

Благодарности
Результаты получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России FNRG-2022-0008 № 075-01595-23-04 «Исследование методов и разработка технологий создания отладочно-моделирующих комплексов для функционального и поведенческого моделирования РТК и групп РТК».

Justification of the architectural appearance of the group control system for rescue robots

Evgeny K. Ignatiadi[1], Peter K. Shubin[1]✉, Marina V. Kuleshova[1], Evgeny V. Pavlov[2]
[1]Russian state scientific center for robotics and technical cybernetics, St. Petersburg, Russia, shubin@rtc.ru
[2]Federal State-Financed Establishment «All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters» (FGBU VNIIPO of the Emergencies Ministry), Balashikha, Moscow Region, Russia

Abstract
In modern conditions of high-intensity warfare in local and global conflicts, the fight against terrorism and the elimination of heterogeneous emergencies, the number of which has been increasing recently, the importance of high-precision navigation, situation monitoring, targeting, communications and management has increased many times. Solving the Issue of operational management is especially relevant in relation to the group management of intelligent robots operating autonomously in a complex, non-deterministic, dynamic environment, taking into account the limited knowledge of each robot about the state and unpredictable dynamics of the external environment. The justification of the architectural appearance of the robot group control system was carried out in relation to the implementation of the project for the development and creation of a ground-based robotic complex, as a increasing group of unmanned universal rescue vehicles of mixed «land-sea-air», amphibious type, with a high degree of autonomy, automation and patency for search and rescue operations in extreme conditions The Arctic and the Far North [2].

Key words
Robotic complex, group management, optimization.

Acknowledgements
The results were obtained as part of the fulfillment of the state task of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation FNRG-2022-0008 № 075-01595-23-04 «Research of methods and development of technologies for creating debugging and modeling complexes for functional and behavioral modeling of RTK and RTK groups».

Реализация концепции создания мобильных гибридных групп роботов (ГР) авиадесантируемого типа для оперативного проведения ПСО в экстремальных условиях Арктики [1] требует, в том числе, и создания эффективной СГУР. Обоснование архитектурного облика СГУР основано на анализе существующих стратегий, алгоритмов и моделей ГУР. Проведенный анализ основных моделей ГУР (модели командной работы автономных агентов: теории общих намерений и общих планов и т. п.) показал, что цели настоящего исследования в наибольшей степени соответствует, так называемый «оптимизационный подход» [2]. Этот анализ выполнен применительно к реализации проекта по разработке и созданию НРК УСС, как наращиваемой гибридной ГР для проведения ПСО в экстремальных условиях Арктики и Крайнего Севера [3]. Как было показано в [4] основным преимуществом проекта НРК УСС является оперативность проведения ПСО, которая требует, в том числе, эффективного ГУР, обеспечивающего оптимальное функционирование ГР при спасании терпящих бедствие людей с поверхности воды, льда и грунта [5].

Согласно формальной постановке задачи ГУР достижение цели, стоящей перед ГР, осуществляется роботами путем согласованных и скоординированных целенаправленных действий. Следовательно, ГР должна быть оснащена соответствующей системой управления. Задача этой СГУР заключается в формировании таких «управлений–действий» каждого робота группы, при которых обеспечивается оптимальное достижение групповой цели с точки зрения некоторого критерия оптимальности [5]. В соответствии с этим процесс ГУР в общем случае может иметь вид, представленный на рисунке. 1.

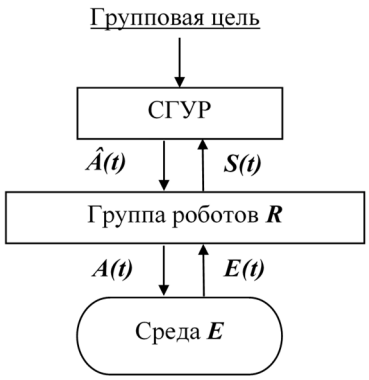


Рисунок 1 — Блок-схема процесса управления для достижения групповой цели

На рисунке 1 обозначено: $\boldsymbol{S(t)}$ – вектор-функция времени *t*, которая описывает состояние ГР $\boldsymbol{Rc(t)}$ и некоторого участка среды $\boldsymbol{Ec(t)}$ в ее окрестности, в момент времени *t;* $\boldsymbol{A(t)}$ – непрерывная вектор-функция, описывающая «управления–действия», выполняемые ГР, состоящей из множества кластеров $i\ (1, N)$: $\boldsymbol{R} = \{\boldsymbol{R_1}, \dots\ \boldsymbol{R_i}, \dots, \boldsymbol{R_N}\}$, на интервале $[t_0,\ t_f\ ]$ от начала до конца работы; $\widehat{\boldsymbol{A}}(\boldsymbol{t})$ – непрерывная вектор-функция, описывающая «управления», осуществляемые СГУР.

Текущее состояние системы «ГР – среда» $\boldsymbol{Sc(t)}$ описывается непрерывной вектор-функцией [6] вида:

$$\boldsymbol{Sc(t)} = \{\boldsymbol{Rc(t)}, \boldsymbol{Ec(t)}\}, \quad (1)$$

При этом, ряд состояний системы «ГР – среда» должен быть запрещён. Простейший пример: положение ГР не может совпадать с положением обслуживаемых объектов или препятствий в среде $\boldsymbol{Ec(t)}$, а также допускать пересечение положений роботов группы между собой. Текущее состояние системы «ГР – среда» $\boldsymbol{Sc(t)}$ должно находиться в допустимых пределах, которые определяют ограничения на множество ее возможных состояний, что можно представить в виде следующего выражения:

$$\boldsymbol{Sc(t)} \in \{\boldsymbol{Spc(t)}\} \subset \{\boldsymbol{Sc}\}, \quad (2)$$

где $\{\boldsymbol{Spc(t)}\}$ – множество допустимых состояний системы «ГР – среда» в момент времени *t;* $\{\boldsymbol{Sc}\}$ – все множество состояний системы «ГР – среда».

Аналогично, допустимые состояния среды, окружающей вокруг ГР в момент времени, *t* описываются выражением:

$$\boldsymbol{Ec(t)} \in \{\boldsymbol{Epc(t)}\} \subset \{\boldsymbol{Ec}\}, \quad (3)$$

$$\boldsymbol{Ec(t)}\ = \{\boldsymbol{E_1(t)}, \dots \boldsymbol{E_i(t)}, \dots, \boldsymbol{E_N(t)}\}, \quad (4)$$

где $\{\boldsymbol{Epc(t)}\}$ – множество допустимых в момент времени *t* состояний окружающей среды вокруг ГР; $\boldsymbol{Ec(t)}$ – непрерывная вектор-функция, описывающая состояния, окружающей среды вокруг ГР, в момент времени *t;* $\boldsymbol{E_i(t)}$ – непрерывная вектор-функция, описывающая состояния окружающей среды вокруг $\boldsymbol{R_i}$ в составе ГР, $i\ (1, N)$, в момент времени *t;* $\{\boldsymbol{Ec}\}$ – множество возможных состояний окружающей среды вокруг ГР.

При этом, состояние ГР – ***R(t)*** в составе системы «ГР – среда» – ***Sc(t)*** можно описать следующими выражениями:

$$\boldsymbol{Rc(t)} \in \{\boldsymbol{Rpc(t)}\} \subset \{\boldsymbol{Rc}\}, \tag{5}$$

$$\boldsymbol{Rc(t)} = \{\boldsymbol{R_1(t)}, \dots \boldsymbol{R_i(t)}, \dots, \boldsymbol{R_N(t)}\}, \tag{6}$$

где $\{\boldsymbol{Rpc(t)}\}$ – множество допустимых в момент времени *t* состояний ГР; $\boldsymbol{Rc(t)}$ – непрерывная вектор-функция, описывающая состояние ГР в момент времени *t;* $\boldsymbol{Ri(t)}$ – непрерывная вектор-функция, описывающая состояние *i*-й подгруппы (кластера) роботов (ПГР$_i$) в составе ГР, $i\ (1, N)$, в момент времени *t;* $\{\boldsymbol{Rc}\}$ – множество возможных состояний ГР.

Под начальным состоянием системы «ГР–среда» будем понимать ситуацию, соответствующую начальному моменту t_0 функционирования группы роботов и определяемую следующими выражениями:

$$\boldsymbol{Sc^0} = < \boldsymbol{R^0}, \boldsymbol{E^0} >, \tag{7}$$

$$\boldsymbol{A^0} = \boldsymbol{A(t_0)},\ \boldsymbol{R^0} = \boldsymbol{R(t_0)}, \boldsymbol{E^0} = \boldsymbol{E(t_0)}. \tag{8}$$

Соответственно конечное – целевое состояние системы к конечному моменту времени выполнения работ (решения целевой задачи) – t_f будет обозначаться:

$$\boldsymbol{Sc^f} = < \boldsymbol{R^f}, \boldsymbol{E^f} >, \tag{9}$$

и определяться вектор-функциями:

$$\boldsymbol{A^f} = \boldsymbol{A(t_f)},\ \boldsymbol{R^f} = \boldsymbol{R(t_f)}, \boldsymbol{E^f} = \boldsymbol{E(t_f)}. \tag{10}$$

Очевидно что время непрерывной работы ГР $t_\text{р} = t_f - t_0$.

На основе информации о групповой цели, состоянии ГР и среды, в которой функционирует группа, её СГУР формирует вектор-функцию «управлений–действий» $\boldsymbol{A(t)}$ для роботов группы. Выполняя совместные действия, роботы целенаправленно изменяют как состояние некоторого участка среды $\boldsymbol{E(t)}$, так и состояние группы роботов $\boldsymbol{R(t)}$, что отражается в изменениях вектор-функции $\boldsymbol{S(t)}$. В результате некоторой совокупности таких действий достигается групповая цель, т. е. система «ГР–среда» переходит из некоторого начального (исходного) состояния в конечное (целевое) состояние. Совокупность, необходимых для достижения групповой цели, совместных действий:

$$\{\boldsymbol{Ac}\} = \{\boldsymbol{A_1}\} \cap \dots \cap \{\boldsymbol{A_i}\} \cap \dots \cap \{\boldsymbol{A_N}\}. \tag{11}$$

Это выражение определяет существо ГУ роботов группы $\boldsymbol{R(t_\text{р})}$ на интервале $[t_0,\ t_f\ ]$, где $\{\boldsymbol{Ai}\}$ – множество «управлений–действий» *i*-й подгруппы (кластера) роботов ПГР$_i$ в составе ГР, $i\ (1, N)$.

Действия, выполняемые ГР, в момент времени *t* могут быть представлены следующими выражениями:

$$\boldsymbol{Ac(t)} \in \{\boldsymbol{Apc(t)}\} \subset \{\boldsymbol{Ac}\}, \tag{12}$$

$$\boldsymbol{Ac(t)} = \{\boldsymbol{A_1(t)}, \dots, \boldsymbol{A_i(t)}, \dots, \boldsymbol{A_N(t)}\}, \tag{13}$$

где $\{\boldsymbol{Apc(t)}\}$ – множество допустимых в момент времени *t* действий ГР; $\boldsymbol{Ac(t)}$ – непрерывная вектор-функция, описывающая действия, выполняемые ГР, в момент времени *t;* $\boldsymbol{A_i(t)}$ – непрерывная вектор-функция, описывающая действия, выполняемые *i*-й подгруппой (кластером) роботов ПГР$_i$ в составе ГР, $i\ (1, N)$; $\{\boldsymbol{Ac}\}$ – все множество действий ГР.

Изменения состояния системы «ГР–среда» можно представить системой дифференциальных уравнений вида:

$$\boldsymbol{\acute{S}c(t)} = \boldsymbol{fc}[\boldsymbol{Sc(t)}, \boldsymbol{A}\text{c}(\boldsymbol{t}), \boldsymbol{g(t)}, \boldsymbol{t}], \tag{14}$$

где $\boldsymbol{\acute{S}c(t)} = \boldsymbol{dSc(t)/dt}$; $\boldsymbol{g(t)}$ – действия каких-либо других сил, в т. ч. ВВФ, присущих арктической среде, которая может быть описана вектор-функцией вида $\boldsymbol{g(t)} = < \boldsymbol{g_1(t)}, \dots, \boldsymbol{g_i(t)}, \dots, \boldsymbol{g_N(t)} >$, где $\boldsymbol{g_i(t)}$ – помеха, действующая на *i*-ю подгруппу (кластер) роботов $\boldsymbol{R_i} \in \boldsymbol{R},\ i\ (1, N)$.

С учетом введенных выше обозначений, задача группового управления роботами на интервале $[t_0,\ t_f\ ]$ заключается в определении таких совместных (11) действий $\boldsymbol{Ac(t)}$ каждого кластера роботов $\boldsymbol{R_i} \in \boldsymbol{R},\ i\ (1, N)$. при которых удовлетворяются система связей (14), начальные условия (7), (8), конечные условия (9), (10), ограничения (3), (5), (12) и обеспечивается максимум функционала

$$\boldsymbol{Yc} = \int_{\boldsymbol{t_0}}^{\boldsymbol{t_f}} \boldsymbol{Fc}[\boldsymbol{Sc(t)}, \boldsymbol{Ac(t)}, \boldsymbol{g(t)}, \boldsymbol{t}]\, \boldsymbol{dt} \tag{15}$$

с помощью которого задаётся цель функционирования ГР и оценивается качество процесса управления. Определенные указанным образом действия $\boldsymbol{A_i c(t)}$, $i\ (1, N)$. являются, очевидно, наиболее рациональными совместными действиями $\boldsymbol{R_i} \in \boldsymbol{R}$, $i\ (1, N)$ – кластеров роботов группы $\boldsymbol{R}$, для достижения поставленной групповой цели $\boldsymbol{Sc^f}$.

Для задач группового управления роботами, функционирующими в условиях динамических, недетерминированных сред, недостаточно только условия существования управления, переводящего систему в целевое состояние. Необходимо, чтобы это управление было найдено за достаточно малое время. При котором состояние $\boldsymbol{Sc(t)} = < \boldsymbol{R(\tau)}, \boldsymbol{E(t)} >$ системы «ГР–среда» существенным образом не изменится (т. е. не станет неприемлемым, неадекватным для выбранного управления $\widehat{\boldsymbol{A}}_{\boldsymbol{i}}(\boldsymbol{t})$, $i(1, N)$. Таким образом, кроме ограничений на переменные состояния и на управления (действиями N кластеров) системы «ГР–среда», должно быть наложено ограничение и на время определения (нахождения) управления $\widehat{\boldsymbol{A}}_{\boldsymbol{i}}(\boldsymbol{t})$, $i(1, N)$. Это значит, что должно быть выполнено условие $t_{\text{у}} \leq \tau_{\text{у}}$, где $t_{\text{у}}$ – время, затрачиваемое на нахождение управления N кластеров, а $\tau_{\text{у}}$ – максимально допустимое время, которое может быть затрачено на определение текущего управления $\widehat{\boldsymbol{A}}_{\boldsymbol{i}}(\boldsymbol{t})$, $i(1, N)$.

Время $\tau_{\text{у}}$ зависит от многих факторов и, прежде всего, от скорости протекания процессов в среде при которых можно полагать $\boldsymbol{Sc(t)} = < \boldsymbol{R(\tau)}, \boldsymbol{E(t)} > \approx \boldsymbol{const}$. В связи с этим ГР полагается управляемой, если существует решение поставленной выше задачи ГУР и оно может быть найдено за время $t_{\text{у}} \leq \tau_{\text{у}}$. Данное определение учитывает как математические, так и технические аспекты задачи ГУР.

Возможный подход к синтезу структуры ГУР на уровне планирования по критерию обеспечения заданного времени принятия группового решения представлен в [6] и [7]. На рисунке 2 приведены качественные зависимости времени принятия решения в системах группового управления, использующих различные стратегии управления, от числа объектов (роботов) в группе. При централизованной стратегии управления сложность задачи ГУР возрастает экспоненциально от числа объектов в ГР и соответственно экспоненциально возрастает время ее решения. При использовании же стратегии децентрализованного ГУР каждый робот ГР принимает решения только за себя, обмениваясь информацией с другими членами ГР с целью оптимизации группового решения. Поэтому время группового решения в такой группе возрастает линейно при увеличении числа ее членов. График времени решения при использовании смешанной стратегии ГУР находится между этими двумя графиками [7].

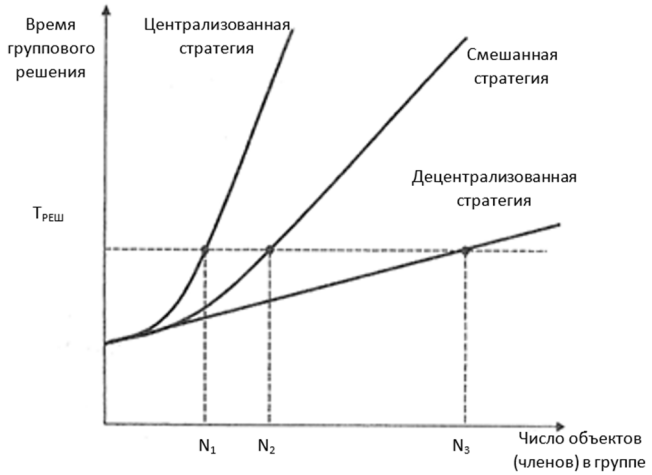
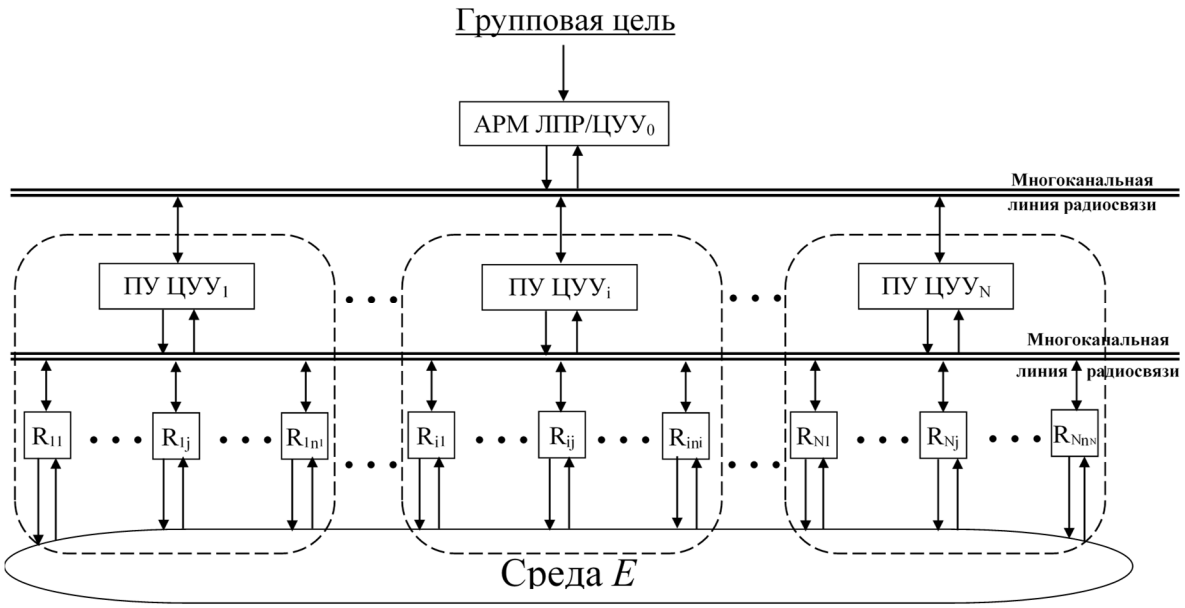


Рисунок 2 — Зависимость времени группового решения от типа стратегии управления и числа объектов ГР

Исходя из графика на рисунке 2, зная число объектов в ГР и требуемое время группового решения $T_{РЕШ} \leq \tau_{\text{у}}$ (меньше максимально допустимого времени, которое может быть затрачено на определение текущего управления), можно выбрать тип стратегии, который более приемлем в данном случае.

Сопоставительный анализ преимуществ и недостатков стратегий ГУР применительно к проекту НРК УСС, связанному с высокими рисками и агрессивным динамическим характером внешней среды показал, что наиболее актуальны стратегии смешанного управления [8]. Стратегия смешанного ГУР, реализуется СГУР при помощи мобильной инфокоммуникационной системы (МИС) в зоне ЧС. Она должна обеспечить выдачу целевых заданий по кластерам (подгруппам) роботов (ПГР – $\boldsymbol{R_i}$) лицом, принимающим решение (ЛПР) или центром удаленного управления (ЦУУ) в составе подсистемы централизованного иерархического управления ГР. Тактические задачи внутри ГР решаются с использованием подсистемы децентрализованного управления по $\boldsymbol{R_i}$, $i(1, N)$. При этом, по аналогии с ситуацией боевых действий, наиболее приемлем коллективный (а при потере связи - стайный) вариант подсистем ГУР в ПГР. Кроме того, подсистема централизованного иерархического управления должна иметь резервные ЦУУ в составе МИС для того, чтобы обеспечить максимальную эксплуатационную живучесть СГУР смешанного типа в целом.

МИС состоит из систем мобильной связи (СМС), обеспечивающих надежный и оперативный информационный обмен между элементами СГУР в зоне функционирования ГР. По-видимому, целесообразна смешанная структура программно-аппаратных средств СМС, которая предусматривает наличие не менее двух многоканальных командно-телеметрических линий мобильной связи. При этом, должен быть обеспечен приоритет линий мобильной связи верхнего уровня, а также информационный обмен всех ЛПР, ЦУУ и роботов со всеми. Кроме того, наличие дублирующих вариантов СМС (сотовая и спутниковая связь) позволит обеспечить высокую надежность и живучесть МИС при реализации СГУР в сложных арктических условиях. Предлагаемый архитектурный облик СГУР в виде структурно-функциональной схемы информационного обмена элементов МИС, ГР и среды представлен на рисунке 3.



АРМ – автоматизированное рабочее место ЛПР; ПУ ЦУУ$_i$ – пульт управления ЦУУ$_i$; N – общее количество ПГР$_i$ (кластеров) в составе ГР и, соответственно, общее количество ЦУУ$_i$; R_{ij} – робот в составе ПГР$_i$, в каждой ПГР$_i$ по n_i роботов, где i (1, N), j (1, n_i)

Рисунок 3 — Архитектурный облик СГУР в виде структурно-функциональной схемы информационного обмена элементов МИС, ГР и среды

Применительно к гибридной ГР НРК УСС рассматриваются кластеры беспилотных летательных аппаратов (БЛА), УСС и роботы-спасатели. Поскольку пребывание БЛА на высоте, обеспечивающей мониторинг окружающей среды, связь и управление в зоне ЧС, ограничен считанными часами, а динамизм обстановки требует длительного непрерывного контроля и управления целесообразно рассмотреть альтернативные варианты. Общеизвестно, что разработка, изготовление, эксплуатация, ремонт и утилизация воздухоплавательных аппаратов (ВПА) существенно дешевле, чем авиационных средств типа самолетов и вертолетов, а также, тем более, космических систем (которые не ремонтопригодны). Безэкипажные ВПА (БВПА) могут длительное время (недели и месяцы) позиционировать на заданной высоте над зоной интереса (ЧС), без существенных затрат энергоресурса, обслуживания и причинения вреда окружающей среде. Кроме того, подъем антенных устройств средств связи и средств мониторинга обстановки (радаров, лидаров и оптикоэлектронных средств) МИС на высоту существенно расширяет их возможности по дальности действия (естественно, с поправкой на располагаемую мощность). Для примера на рисунке 4 показана кривая зависимости дальности прямой видимости от высоты подъема БВПА с установленными на нем антенными устройствами МИС.

Поэтому, в качестве возможного аналога БВПА, предназначенного для обеспечения реализации СМС в зоне возможного функционирования ГР, может быть рассмотрена, в частности, тактическая аэростатная система (CAPS) США. Аэростатная платформа предназначена для военного ведомства США и способна поднимать на высоту 300 м около 100 кг полезной нагрузки, чтобы обеспечить сотовую связь, оперативное восстановление информационных сетей и коммуникаций в зоне ЧС, военных действий, природных и техногенных катастроф, террористического акта [9].

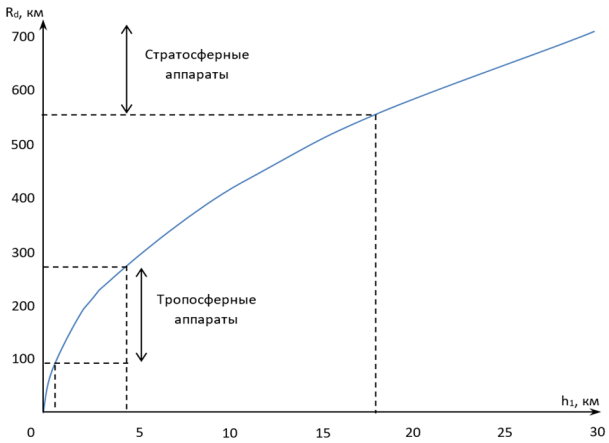


Рисунок 4 — Зависимость дальности прямой видимости от высоты подъема ВПС с установленными на нем антенными устройствами МИС

В качестве отечественного прототипа БВПА рассмотрен автономный комплекс воздушного наблюдения с наземным пунктом управления на основе малообъемных привязных аэростатов типа МПА. Он предназначен для осуществления воздушного видеонаблюдения при обеспечении аварийно-спасательных работ в процессе ликвидации ЧС и их последствий, а также передачи видеоизображения и голосовой информации удаленным пользователям по каналам спутниковой связи. Применяется в составе комплекса разведки, управления и связи (КРУС) в интересах МЧС и МВД России [10].

В качестве антенных устройств МИС на БВПА, в перспективе, целесообразно применить активные фазированные антенные решетки (АФАР), которые получили существенное развитие как в части функциональных (связь и радиолокация), так и в части эксплуатационных (компактность, технологичность, надежность) и стоимостных (уменьшение цены) характеристик в последнее время [11].

Например, на рисунке 5 показано возможное применение радаров с многолучевыми АФАР, которые позволяют быстро обнаруживать и сопровождать в пространстве одновременно несколько наблюдаемых объектов [11], [12].

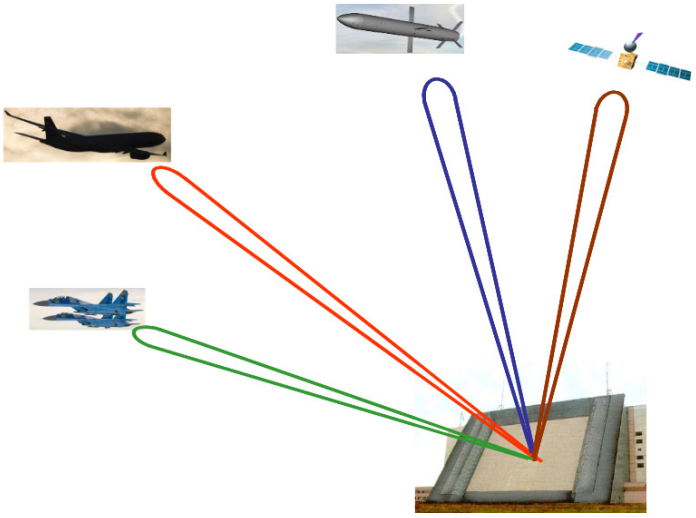


Рисунок 5 — Возможное применение радаров с многолучевыми АФАР, имеющими несколько независимых приемных лучей

Российские истребители пятого поколения Су-57 уже получили так называемую «умную обшивку», которая представляет собой фазированную антенную решетку радиолокационной станции разработки НИИП и Государственного Рязанского приборного завода (ГРПЗ), входящего в КРЭТ [13]. Такая «умная обшивка» может обеспечить БВПА (МПА) новые возможности, в частности, круговой обзор и связь на сотни километров в районе возможного функционирования ГР в зоне ЧС.

В дальнейших исследованиях целесообразно рассмотреть модели и алгоритмы оптимального управления поведением роботов при совместном выполнении ими поставленных задач автономной миссии с учетом стохастичности происходящих процессов в рамках модели усовершенствованного «оптимизационного подхода». Для реализации предлагаемого архитектурного облика СГУР необходимо сформировать наиболее адекватный вариант МИС и технических средств программно-аппаратного обеспечения его функционирования в зоне действия разнородных (гибридных) ГР.

Литература

1. Лопота, А. В. Концептуальные вопросы разработки роботизированных систем для поиска и спасания людей, терпящих бедствие, в условиях Арктики / А. В. Лопота, П. К. Шубин // Робототехника и техническая кибернетика. – 2018. – № 1(18). – С. 3-9. – EDN YZNFJB. – Текст : непосредственный.

2. Битный-Шляхто, В. М. Подход к решению задачи оптимизации функционирования группы автономных роботов при спасании людей в арктических условиях / В. М. Битный-Шляхто, П. К. Шубин, М. В. Кулешова // Экстремальная робототехника. – 2022. – № 1(33). – С. 334-339. – EDN SSRHIA. – Текст : непосредственный.

3. Создание наземного роботизированного комплекса универсальных спасательных средств для Арктики и Крайнего Севера / М. А. Шахраманьян, И. В. Нестеров, Е. В. Павлов [и др.] // Экстремальная робототехника. – 2021. – № 1(32). – С. 303-311. – EDN NKKTQC. – Текст : непосредственный.

4. Shubin, P. Comparative assessment of rescue operation effectiveness in Arctic conditions / P. Shubin // Arctic: History and Modernity : труды ежегодной международной научной конференции, Санкт-Петербург, 18–19 апреля 2019 года / Ответственные редакторы: С. В. Кулик, Самыловская, технический редактор Р.-Е. А. Кудрявцева. – Санкт-Петербург: Политех-Пресс, 2019. – P. 126-136. – EDN PFNABD. – Текст : непосредственный.

5. Шубин, П. К. Оптимизация группового управления роботами в Арктических условиях / П. К. Шубин, М. В. Кулешова // Робототехника и техническая кибернетика. – 2024. – Т. 12, № 1. – С. 31-35. – DOI 10.31776/RTCJ.12104. – EDN VKBQRA. – Текст : непосредственный.

6. Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г. Методы и алгоритмы коллективного управления в группах роботов // М.: Физматлит. – 2009. – 280 с. – Текст : непосредственный.

7. Юревич Е.И. О проблеме группового управления роботами. // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2004. – № 2. – С. 9-13. – Текст : непосредственный.

8. Шубин, П.К. Разработка архитектурного облика системы группового управления роботами в арктических условиях / П. К. Шубин, М. В. Кулешова, Е. В. Павлов // Сборник материалов по вопросам развития робототехники в МЧС России : Материалы круглых столов (в рамках проведения XV Международного салона средств обеспечения безопасности «Комплексная безопасность-2024»), Кубинка, 30–31 мая 2024 года. – Москва: Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России» (федеральный центр науки и высоких технологий), 2024. – С. 219-230. – EDN JPPAFX. – Текст : непосредственный.

9. Малообъемные актуальные привязники // © АЭРОКРАТ КОНЦЕПТ / © AEROCRAT CONCEPT. – LiveJournal. – 29 сентября 2007. – URL: https://aerocrat.livejournal.com/21659.html (дата обращения: 01.07.2024). – Текст : электронный.

10. Изготовлен и сдан в эксплуатацию малообъемный привязной аэростат тип МПА // Мастерская надувных конструкций AiR77. – 25.10.2012. – URL: https://www.air77.ru/news/15.htm (дата обращения: 01.07.2024). – Текст : электронный.

11. Шишлов А.В., Денисенко В.В., Левитан Б.А., Топчиев С.А., Шитиков А.М.. Активные фазированные антенные решетки – состояние и тенденции развития. Журнал радиоэлектроники, 2023 № 1. Текст : электронный.

12. Шишлов А.В., Левитан Б.А., Топчиев С.А., Анпилогов В. Р., Денисенко В.В. Многолучевые антенны для систем радиолокации и связи. Журнал радиоэлектроники. 2018. №7. С.1-40. Текст : электронный.

13. АФАР – новое зрение современных истребителей // КРЭТ, – 13.02.2019. – URL: https://rostec.ru/news/afar-novoe-zrenie-sovremennogo-istrebitelya-/ (дата обращения: 01.07.2024). – Текст : электронный.

Информация об авторах

Игнатиади Евгений Константинович, главный конструктор по интеллектуальным системам управления и робототехнике, Государственный научный центр Российской Федерации «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики» (ГНЦ РФ ЦНИИ РТК), Россия, Санкт-Петербург, 194064, Тихорецкий пр., 21, e.ignatiadi@rtc.ru

Шубин Петр Константинович, к.т.н., с.н.с., начальник лаборатории, ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Россия, Санкт-Петербург, 194064, Тихорецкий пр., 21, shubin@rtc.ru

Кулешова Марина Викторовна, ведущий инженер, ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Россия, Санкт-Петербург, 194064, Тихорецкий пр., 21, kuleshova@rtc.ru

Павлов Евгений Владимирович, с.н.с., научно-исследовательский центр пожарной техники и пожарной автоматики, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий» (ФГБУ ВНИИПО МЧС России), Россия, 143903, Московская область, г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, д. 12, pavlov-vp@mail.ru

Исследование и разработка системы стабилизации длиннофокусной камеры мобильного робота

А.В. Мымрин, В.В. Варлашин✉
Государственный научный центр Российской Федерации «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики» (ГНЦ РФ ЦНИИ РТК), Санкт-Петербург, Россия, v.varlashin@rtc.ru

Аннотация
В работе реализована виртуальная сцена, где наводный робот с установленной на нем камерой движется под воздействием волн, угловая частота и амплитуда которых известны. Движение модели камеры может повторяться при помощи манипулятора UR5e, а скорости и ускорения его выходного звена могут использоваться для оценки возникающих моментов сил и выбора привода, компенсирующего колебания камеры.

Ключевые слова
Стабилизация, мобильный робот, виртуальная среда, манипулятор, движение камеры.

Research and development of a stabilization system for a long-focus camera of a mobile robot

Anton V. Mymrin, Viktor V. Varlashin✉
Russian state scientific center for robotics and technical cybernetics, St. Petersburg, Russia, v.varlashin@rtc.ru

Abstract
In this paper, a virtual scene is realized where a flood robot with a camera mounted on it moves under the influence of waves. camera installed on it moves under the influence of waves, the angular frequency and amplitude of which are known. of which are known. The motion of the camera model can be repeated using the UR5e manipulator, and the velocities and accelerations of its of its output link can be used to estimate the resulting moments of force and to selection of an actuator to compensate for the camera oscillations.

Key words
Stabilization, mobile robot, virtual environment, manipulator, motion of the camera.

Введение

На сегодняшний день задача стабилизации видео решается в таких областях, как кинематограф [1], мониторинг дорожного движения [2], выполнение поисково-спасательные операции с использованием робототехнических комплексов. В случаях, когда камера закреплена на движущемся объекте, таком как БПЛА или наземном или наводном мобильном роботе, движущемся по пересеченной местности, возникают нежелательные движения камеры, которые могут исказить изображение, особенно в случае выполнения наблюдения на дальних расстояниях при помощи длиннофокусной камеры.

Средства аппаратной стабилизации способны улучшать качество изображения, не прибегая к использованию алгоритмов технического зрения. Механические стабилизаторы компенсируют возникающие колебания камеры посредством ее перемещения в противоход колебаниям. Кроме того, возможность менять ориентацию камеры в пространстве позволяет не только стабилизировать изображение, но и следить за определенным объектом в кадре. При использовании механических стабилизаторов нет необходимости обрабатывать видеопоток, однако присутствует необходимость в разработке алгоритма управления стабилизатором для компенсации колебаний камеры.

Предполагается, что механический стабилизатор должен эффективно компенсировать нежелательные движения в ограниченном диапазоне внешних воздействий, будь то волны, действующие на плавающую платформу, или пересеченная местность, по которой движется мобильный робот. Анализируя данные нежелательные движения камеры, можно оценить возникающие при движении камеры моменты сил, и на основании полученных данных подобрать приводные системы для стабилизатора, а также синтезировать алгоритмы управления, обеспечивающие управление с заданной точностью. Сама камера, как и внешние воздействия, могут быть смоделированы при помощи виртуальной среды с физическим движком. Возможность настраивать параметры моделируемых внешних воздействий позволяет экспериментально оценить их влияние на движение камеры, а также сгенерировать достаточно большой набор данных для того, чтобы при синтезе алгоритма управления стабилизатора настроить параметры регулятора при помощи нейронных сетей.

Сцена в виртуальной среде моделирования

В среде Unity [3] создана виртуальная сцена (рисунок 1), где наводный робот с установленной на нем камерой двигается по течению с заданной скоростью. S (1):

$$y = a \cdot cos(c \cdot t + p_1) + b \cdot cos(d \cdot t + p_2), \quad (1)$$

где p_1, p_2 – перлиновский шум; *a, b* – амплитуда волн; *c, d* – угловая частота волн.

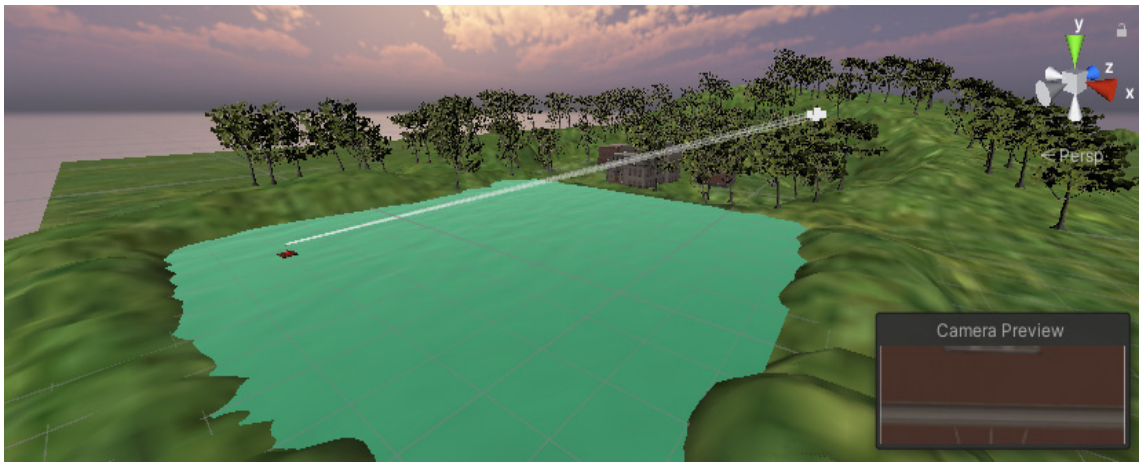


Рисунок 1 — Сцена в Unity

На рисунке 2 изображены зависимости перемещения и вращения камеры, установленной на движущемся по реке плоту, от времени.

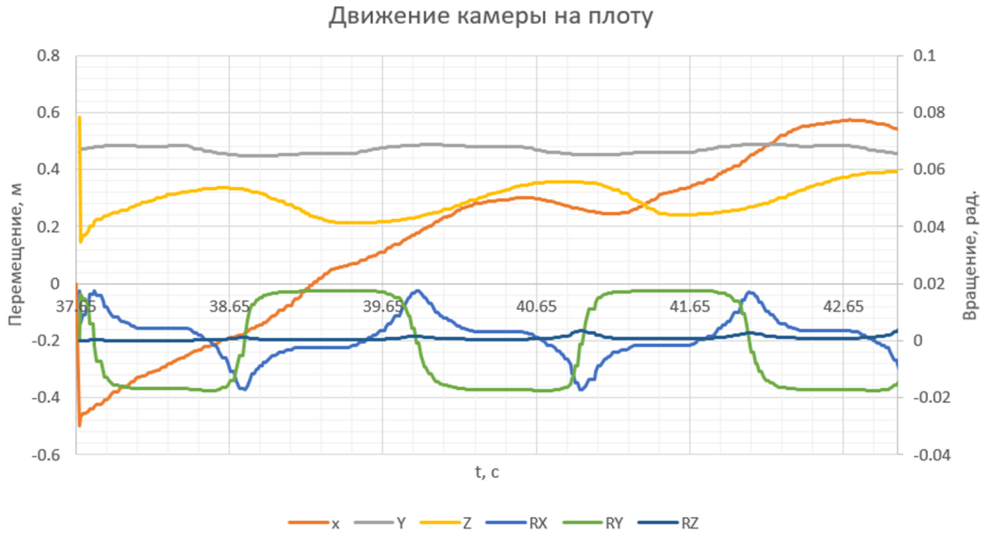


Рисунок 2 — Перемещение и вращение камеры

Воспроизведение на манипуляторе

При проведении экспериментов получены зависимости перемещения и вращения камеры, установленной на движущемся по реке роботе, от времени. Полученные зависимости от времени положений камеры, закрепленной на платформе, движущейся под воздействием волн, заданных согласно уравнению (1), можно воспроизвести с использованием манипулятора типа UR5e [4] ф. Universal Robot для имитации волн при натурном эксперименте. Для получения априорных данных, полученные зависимости можно воспроизвести на его виртуальной модели (рисунок 3), достаточно точно повторяющей движения реального манипулятора.

Движение камеры в сцене повторяется при помощи манипулятора UR5e. Зависимость от времени движения выходного звена манипулятора изображена на рисунке 4.

Полученные в результате моделирования движения камеры зависимости угловых скоростей и ускорений могут быть использованы для оценки необходимых для компенсации движения камеры моментов сил. На рисунке 5 изображена зависимость от времени угловых скоростей выходного звена манипулятора.

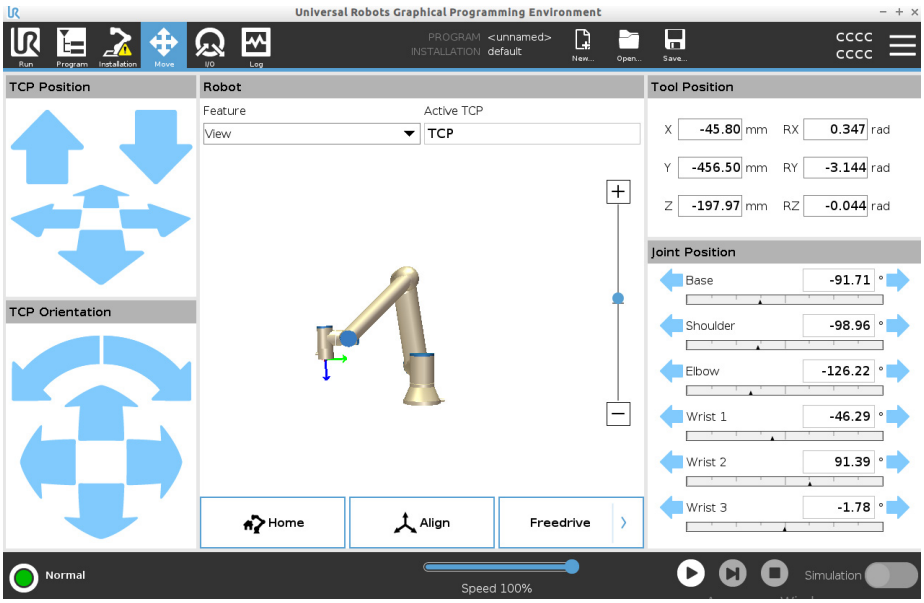


Рисунок 3 — Виртуальная модель манипулятора UR5e

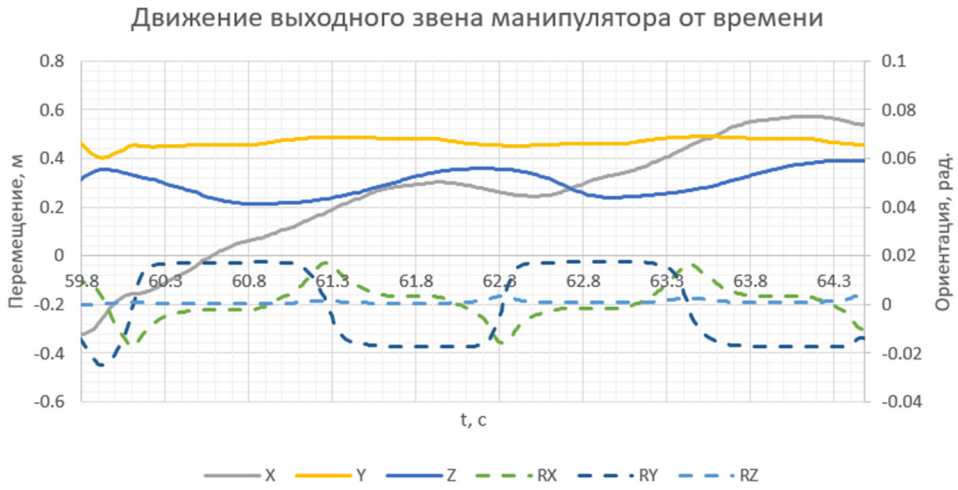


Рисунок 4 — Движение выходного звена манипулятора

Рисунок 5 — Угловые скорости вращения

Вычислим угловые ускорения ε в каждый момент времениt_i по формуле

$$\varepsilon_i = \frac{\omega_{i-1} - \omega_{i+1}}{2(t_{i-1} - t_{i+1})},$$

где ω – угловая скорость.

График зависимости угловых ускорений от времени изображен на рисунке 6.

Рисунок 6 — Зависимость ускорений от времени

Оценка моментов сил

Моменты, возникающие при вращении камеры определяются по формуле

$$M = I \cdot \frac{d\omega}{dt} + M_c,$$

где I – момент инерции; ω – угловая скорость вращения камеры; M_c – момент статических сил.

Камеру представим в виде параллелепипеда со сторонами l, h, w равными соответственно 157, 75 и 67 мм. Масса камеры m равна 0,6 кг.

На рисунке 7 изображена ось c', вокруг которой вращается камера и ось c, проходящая через центр масс.

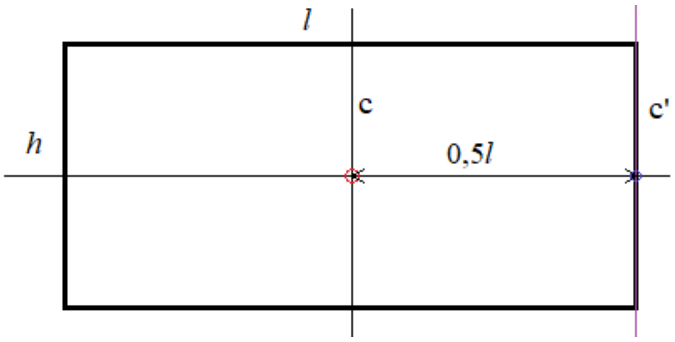


Рисунок 7 — Оси вращения камеры

Момент инерции параллелепипеда при вращении вокруг оси c' вычисляется по формуле

$$I = I_c + ma^2,$$

где I_c – момент инерции при вращении вокруг оси c; a – расстояние от оси c' до c, равное $0{,}5l$.

Момент инерции I_c вычисляется по формуле

$$I_c = \frac{m(h^2 + l^2)}{12}$$

Момент, вызываемый силой тяжести, рассчитывается как

$$M_c = ma = 0{,}5ml = 0{,}0471\text{Н} \cdot \text{м}$$

На рисунке 8 изображена зависимость моментов, возникающих при вращении камеры от времени.

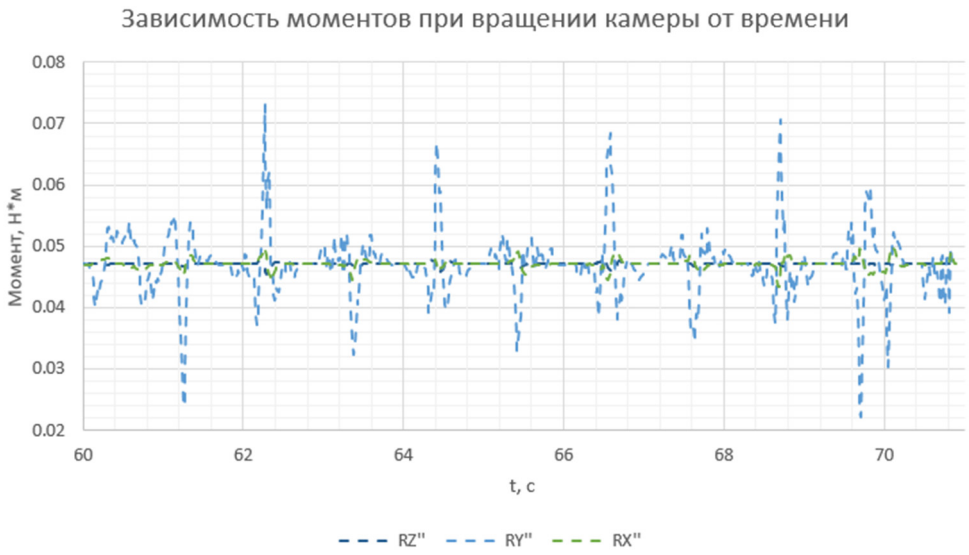


Рисунок 8 — Зависимость моментов от времени

Из рисунка видно, что максимальный возникающий момент равен 0,073 Нм.Таким образом, рассчитав моменты сил, возникающие при движении камеры, а также их зависимости от времени, в дальнейшем может быть выбран привод, компенсирующий колебания камеры по каждой из осей. В дальнейшем планируется разработать стабилизатор длиннофокусной камеры мобильного робота и решить задачу слежения за объектами на дальнем расстоянии.

Литература

1. Sayed M. et al. Lookout! interactive camera gimbal controller for filming long takes //ACM Transactions on Graphics (TOG). – 2022. – Т. 41. – №. 3. – С. 1-16.
2. Liu X. et al. Real-time visual tracking of moving targets using a low-cost unmanned aerial vehicle with a 3-axis stabilized gimbal system //Applied Sciences. – 2020. – Т. 10. – №. 15. – С. 5064.
3. Платформа Unity для разработки в реальном времени: [Электронный ресурс].URL: https://unity.com/ru
4. Universal Robots: [Электронный ресурс].URL: https://www.universal-robots.com/products/ur5-robot/.

Информация об авторах

Мымрин Антон Владимирович, инженер, Государственный научный центр Российской Федерации «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики» (ГНЦ РФ ЦНИИ РТК), Россия, 194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 21

Варлашин Виктор Витальевич, к.т.н., начальник лаборатории, ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Россия, 194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 21, v.varlashin@rtc.ru.

Математическое моделирование управляемого движения подводного манипулятора при перемещении груза

В.А. Леонтьев
Государственный научный центр Российской Федерации «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики» (ГНЦ РФ ЦНИИ РТК), Санкт-Петербург, Россия, vleont@rtc.ru

Аннотация
Разработана компьютерная модель подводного манипулятора, расположенного на дне. Учитывались силы гравитации, выталкивающие силы и силы сопротивления воды, действующие на все элементы конструкции. Управление задается в виде модели регуляторов с обратной связью, работающих по ошибках в скоростях штоков гидроцилиндров и в положениях этих штоков. Проведено численное моделирование динамики управляемого движения подводного манипулятора, при отработке заданной плоской траектории перемещения захвата с грузом. В результате сделан вывод о значительном преимуществе совместного управления по ошибкам в скоростях штоков и в их положениях (PD-регуляторы), по сравнению с простым управлением по ошибкам в скоростях штоков приводных гидроцилиндров (D-регуляторы).

Ключевые слова
Подводный манипулятор, управляемое движение, гидродинамические силы, моделирование динамики.

Благодарности
Работа выполнена в рамках Государственного задания № 075-00697-24-01 от 03.04.2024 г. «Поиск путей создания глубоководного гидравлического манипулятора для подводно-технических работ, в том числе в условиях ионизирующего излучения» (FNRG-2022-0021, регистрационный номер 1021101316133-1-2.2.2).

Mathematical modeling of the controlled movement of underwater manipulator when moving the load

Victor A. Leontev
Russian state scientific center for robotics and technical cybernetics, St. Petersburg, Russia, vleont@rtc.ru

Abstract
A computer model of an underwater manipulator located at the bottom had been developed. The forces of a gravity were taken into account, as well as pushing vertical forces and forces of water resistance acting on all structural elements. Control is set in the form of a model of feedback regulators operating by errors in the speeds of hydraulic cylinder rods and in the positions of these rods. The numerical modeling of dynamics of the controlled movement of the underwater manipulator was carried out, when performing a given flat trajectory of movement of grip with the load. As a result, a conclusion was drawn about the significant advantage of joint management by errors in the speeds of the rods and in their positions (feedback PD-regulators), compared with simple controls in errors only in speeds of drive hydraulic cylinders (feedback D-regulators).

Key words
Underwater manipulator, controlled movement, hydrodynamic forces, dynamics simulation.

Acknowledgements
The work was carried out as a part of the State assignment No. 075-00697-24-01 from April 03, 2024 «The search for ways to create a deep-sea hydraulic manipulator for underwater work, including the conditions of ionizing radiation» (FNRG-2022-0021, Registration number 1021101316133-1-2.2.2).

Постановка задачи

Необходимо изучить точность управления подводным манипулятором с грузом в его захвате, построив модели двух типов регуляторов с обратной связью, действующих по трем основным (транспортным) степеням подвижности. Прежде всего требуется построить механическую модель манипулятора с учетом всех действующих на него сил под водой - сил тяжести, выталкивающих сил Архимеда, сил сопротивления воды и так называемых сил присоединенных масс воды. Необходимо в итоге сравнить возможности управления только по ошибкам в скоростях штоков гидроцилиндров (D-регуляторы), с возможностями регуляторов, работающих

также и по ошибкам в положениях гидроцилиндров (PD-регуляторы). Численное моделирование производится в компьютерной программе MSC.ADAMS/View.

Разработка компьютерной модели подводного манипулятора

В расчетной программе была построена реалистичная модель подводного манипулятора с грузом на конце и с основными звеньями, вращающимися под действием трех гидроцилиндров со штоками, движущимися под воздействием управляющих сил (см. рис.1.). Были учтены не только силы веса всех элементов конструкции и выталкивающие архимедовы силы, но также учтены все гидродинамические силы сопротивления, и так называемые силы присоединенных масс воды.

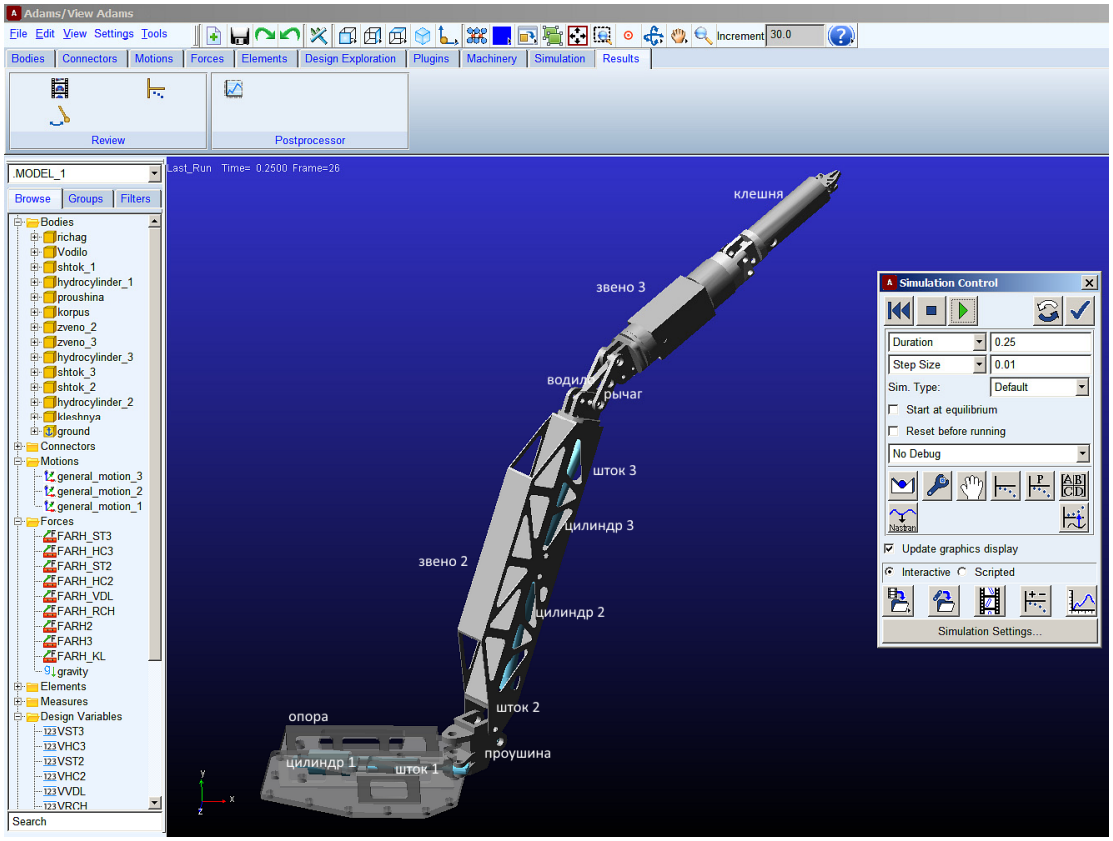


Рисунок 1 — Состоящая из твердых звеньев (bodies) конструкция манипулятора

В модели имеются следующие 13 звеньев: korpus (опора манипулятора, или звено 1); hydrocylinder_1; shtok_1; proushina (тело, передающее действие штока 1 на поворот звена 2 вокруг вертикальной оси); zveno_2 (наибольшее звено решетчатого типа); hydrocylinder_2; shtok_2; hydrocylinder_3; shtok_3; vodilo (тело, передающее действие штока 3 на поворот звена 3); richag (тело, сцепляющее звенья 2 и 3); zveno_3; kleshnya (конечное звено манипулятора с захватом).

Сформированы также основные шарниры, связывающие движения звеньев модели подводного манипулятора: JOINT_Fix_Korpus_Ground (замок, жестко прикрепляющий опору манипулятора ко дну); JOINT_Korpus_Cylinder_1 (вращательный шарнир, определяющий поворот цилиндра 1 относительно корпуса); JOINT_01 (поступательный шарнир, действующий между штоком 1 и гидравлическим цилиндром 1); JOINT_shtock1_proushina (вращательный шарнир, задающий поворот проушины относительно штока 1); JOINT_proushina_korpus (вращательный шарнир, задающий поворот проушины относительно корпуса); JOINT_zveno_2_proushina (вращательный шарнир, задающий поворот проушины относительно звена 2); JOINT_proushina_shtock_2 (вращательный шарнир, задающий поворот штока 2 относительно звена проушины); JOINT_02 (поступательный шарнир, действующий между штоком 2 и гидравлическим цилиндром 2); JOINT_zveno_2_cylinder_2 (сферический шарнир, задающий свободный поворот цилиндра 2 относительно звена 2); JOINT_zveno_2_cylinder_3 (сферический шарнир, задающий свободный поворот цилиндра 3 относительно звена 2); JOINT_03 (поступательный шарнир, действующий между штоком 3 и гидравлическим цилиндром 3); JOINT_shtock_3_vodilo (цилиндрический шарнир, задающий поворот водила относительно штока 3); JOINT_zveno_2_vodilo (вращательный шарнир, задающий поворот водила относительно звена 2); JOINT_vodilo_zveno_3 (вращательный шарнир, задающий поворот звена 3 относительно водила); JOINT_richag_zveno2 (вращательный шарнир, задающий поворот рычага относительно звена 2); JOINT_richag_zveno_3 (вращательный шарнир, задающий поворот рычага относительно звена 3);

JOINT_Kleshnya_Zveno_3 (вращательный шарнир, задающий поворот конечного звена манипулятора относительно звена 3).

Для исходной модели за материал конструкции манипулятора была выбрана сталь, с плотностью ρ_{steel} = 7801 кг/ м^3 . Соответственно, суммарная масса всей конструкции модели манипулятора (материал - сталь) рассчитана равной M_{st} = 200 кг.

1) Задание архимедовых выталкивающих сил

Вертикальные выталкивающие архимедовы силы приложены в центрах масс звеньев, и вычисляются по формуле

$$F_{ARH} = \rho * V_i * g, \quad (1)$$

где ρ = 1020 кг/ м^3 - плотность морской воды; g = 9.80665 м/ сек^2 - ускорение свободного падения; V_i - объем звена. Соответственно, в модель подводного манипулятора были введены 10 вертикальных архимедовых сил, действующих на подвижные части конструкции: FARH2 - приложенная к звену 2; FARH3 - приложенная к звену 3; FARH_HC2 - приложенная к гидроцилиндру 2; FARH_ST2 - приложенная к штоку 2; FARH_HC3 - приложенная к гидроцилиндру 3; FARH_ST3 - приложенная к штоку 3; FARH_VDL - приложенная к водилу; FARH_RCH - приложенная к рычагу; FARH_KL - приложенная к конечному звену; FARH_LOAD - архимедова сила приложенная к шару-нагрузке, находящемуся в захвате манипулятора.

2) Задание гидродинамических сил сопротивления (вода считается неподвижной относительно дна - течение не учитывается)

а) корпус (опора манипулятора, или звено 1) - см. твердые тела на Рис. 1:

корпус манипулятора считается неподвижно закрепленным на дне, поэтому на корпус никакие гидродинамические силы сопротивления не действуют.

б) гидроцилиндр 1 и шток 1:

гидроцилиндр 1 и шток 1 почти не перемещаются, поэтому действующие на них гидродинамические силы сопротивления ничтожны (считаются отсутствующими).

в) проушина: проушина поворачивается вокруг вертикальной оси Y, передавая поступательное перемещение конца штока 1 на поворот решетчатого звена 2 вокруг вертикальной оси. В силу этого, на ось центра масс $x_{см}$ проушины, перпендикулярной к плоскости проушины, согласно формуле (2), см. [1], [2] - действует оператор силы сопротивления (3), где $S_{x,y,z}$ − площадь миделева сечения тела:

$$F_{x,y,z} = -C_f \frac{\rho v_{x,y,z}^2}{2} S_{x,y,z} \quad (2)$$

SFORCE_x_proushina = -1.0*0.5*0.03*rH2O*SIGN(1,VX(proushina.cm,MARKER_D,proushina.cm))
*VX(proushina.cm,MARKER_D,proushina.cm)**2, (3)

где коэффициент сопротивления $C_f = 1.0$; миделево сечение проушины S_x = 0.03 м^2 , rH2O - плотность морской воды ρ = 1020 кг/ м^3 ; VX - проекция скорости центра масс проушины относительно воды на ось $x_{см}$ проушины; MARKER_D - маркер неподвижной системы координат, закрепленной на дне.

Аналогичным образом, по общей формуле (2) в модели заданы гидродинамические силы сопротивления: г) SFORCE_x_zveno2 и SFORCE_y_zveno2 - силы, действующие по осям $x_{см}$ и $y_{см}$ решетчатого звена 2 (вместе с двумя гидроцилиндрами 2 и 3); д) SFORCE_y_vodilo и SFORCE_z_vodilo - силы, действующие по осям центра масс $y_{см}$ и $z_{см}$ водила; е) SFORCE_x_richag, SFORCE_y_richag, SFORCE_z_richag - силы, действующие по осям центра масс $x_{см}$, $y_{см}$, $z_{см}$ рычага, придерживающего звено 3; ж) SFORCE_x_zveno3 и SFORCE_y_zveno3 - силы, действующие по осям центра масс $x_{см}$, $y_{см}$ звена 3; з) SFORCE_x_kleshnya, SFORCE_y_kleshnya, SFORCE_z_kleshnya - силы, действующие по осям центра масс $x_{см}$, $y_{см}$, $z_{см}$ конечного звена (клешни); к) SFORCE_x_load, SFORCE_y_load, SFORCE_z_load - силы, действующие по осям центра масс $x_{см}$, $y_{см}$, $z_{см}$ нагрузки в захвате в виде стального шара массой 4 кг и диаметром 10 см.

3) Задание сил присоединенных масс воды

Согласно литературе [1], [2], для обтекаемого твердого тела проекция силы присоединенной массы воды (x-A) на ось центра масс (x) пропорциональна ускорению a_x его центра масс:

$$F_{x-A} = -k_{11} \rho V_L a_x, \quad (4)$$

где V_L - объем тела, k_{11} - коэффициент формы тела, взятый из таблиц или номограмм.

в) проушина: для этого тела существует противодействие присоединенных масс воды, направленное только по его оси $x_{см}$. Соответственно, для этой силы имеем:

SFORCE_(A)_x_proushina = - 0.5*rH2O*0.002*ACCX(proushina.cm,MARKER_D,proushina.cm), (5)

где коэффициент $k_{11} = 0.5$ взят из номограммы в книге [1]; Объем проушины $V_L = 002$ м^3, ACCX - оператор ускорения a_x относительно воды по оси центра масс проушины $x_{см}$.

Аналогичным образом, по общим формулам (4)-(5) в модели заданы силы присоединенных масс воды для других тел:

г) SFORCE_(A)_x_zveno 2 и SFORCE_(A)_y_zveno 2 - силы присоединенных масс, действующие по осям центра масс $x_{см}$, $y_{см}$ звена 2; д) SFORCE_(A)_x_zveno 3 и SFORCE_(A)_y_zveno 3 - силы присоединенных масс, действующие по осям центра масс $x_{см}$ и $y_{см}$ звена 3; е) SFORCE_(A)_x_kleshnya и SFORCE_(A)_y_kleshnya - силы присоединенных масс, действующие по осям центра масс $x_{см}$, $y_{см}$ клешни ж) SFORCE_(A)_x_LOAD, SFORCE_(A)_y_LOAD, SFORCE_(A)_z_LOAD - силы присоединенных масс, действующие по осям центра масс $x_{см}$, $y_{см}$, $z_{см}$ шара-нагрузки.

Численное моделирование управляемого движения подводного манипулятора

В качестве пробной траектории управляемого движения захвата манипулятора с грузом была выбрана заданная замкнутая плоская фигура (квадрат) (см. рис. 2):

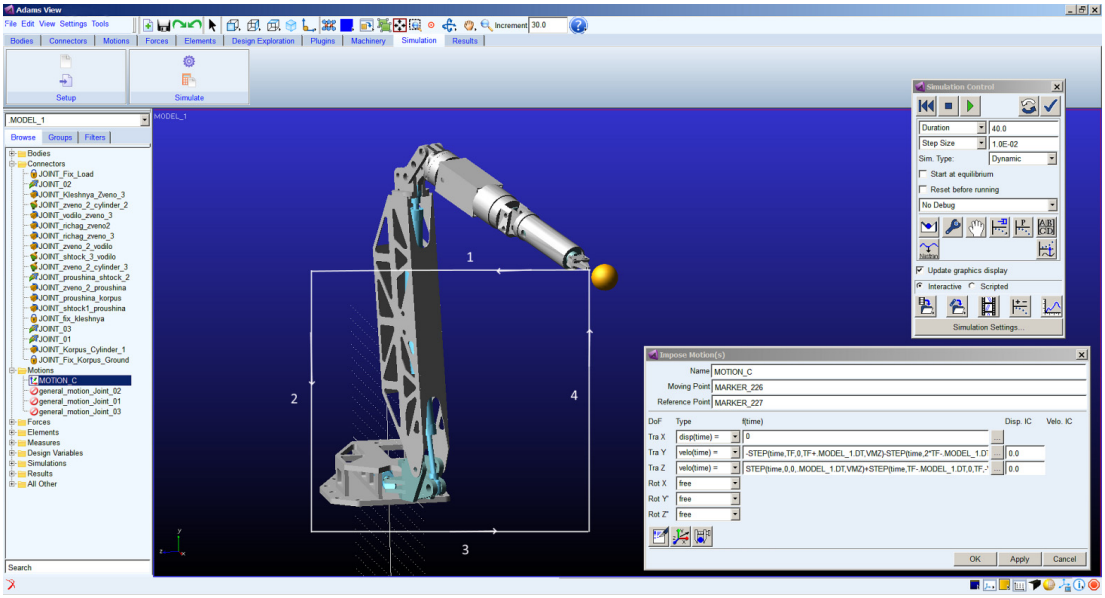


Рисунок 2 — Планируемая плоская траектория захвата с грузом

Эта плоская траектория (квадрат, перпендикулярный к оси X) состоит из 4-х участков 1, 2, 3 и 4 длиной по 1 м. В захвате находится груз массой 4 кг. Время прохождение одного участка равно 10 сек. Чтобы получить соответствующие скорости и изменения положений требуемых движений штоков гидроцилиндров были заданы, в операторе MOTION_C, следующие проекции скоростей движения конечной точки захвата C, с использованием встроенных в моделирующую программу трапециевидных функций времени STEP:

$$V_x = 0 \qquad (6)$$

V_y = - STEP(time,TF,0,TF+.MODEL_1.DT,VM) - STEP(time,2*TF-.MODEL_1.DT,0,2*TF,-VM)
+ STEP(time,3*TF,0,3*TF+.MODEL_1.DT,VMZ) + STEP(time,4*TF-.MODEL_1.DT,0,4*TF,-VM)

V_z = STEP(time,0,0,.MODEL_1.DT,VM) + STEP(time,TF-.MODEL_1.DT,0,TF,-VM)
- STEP(time,2*TF,0,2*TF+.MODEL_1.DT,VMZ) - STEP(time,3*TF-.MODEL_1.DT,0,3*TF,-VM).

Здесь TF - время движения по одному участку, равное 10 сек., тогда общее время движения 4TF = 40 сек.; VM - максимальная скорость захвата на участке, равная 0.125 м/сек. DT = 2 сек - время линейного выхода (или схода) на максимальную скорость. В результате выбора этих параметров длина одного участка равна 1 м.

В итоге реализации данного закона движения захвата, получились следующие требуемые законы изменения скоростей и положения штоков гидроцилиндров, представленные в виде сплайнов от времени (см. рис. 3-8):

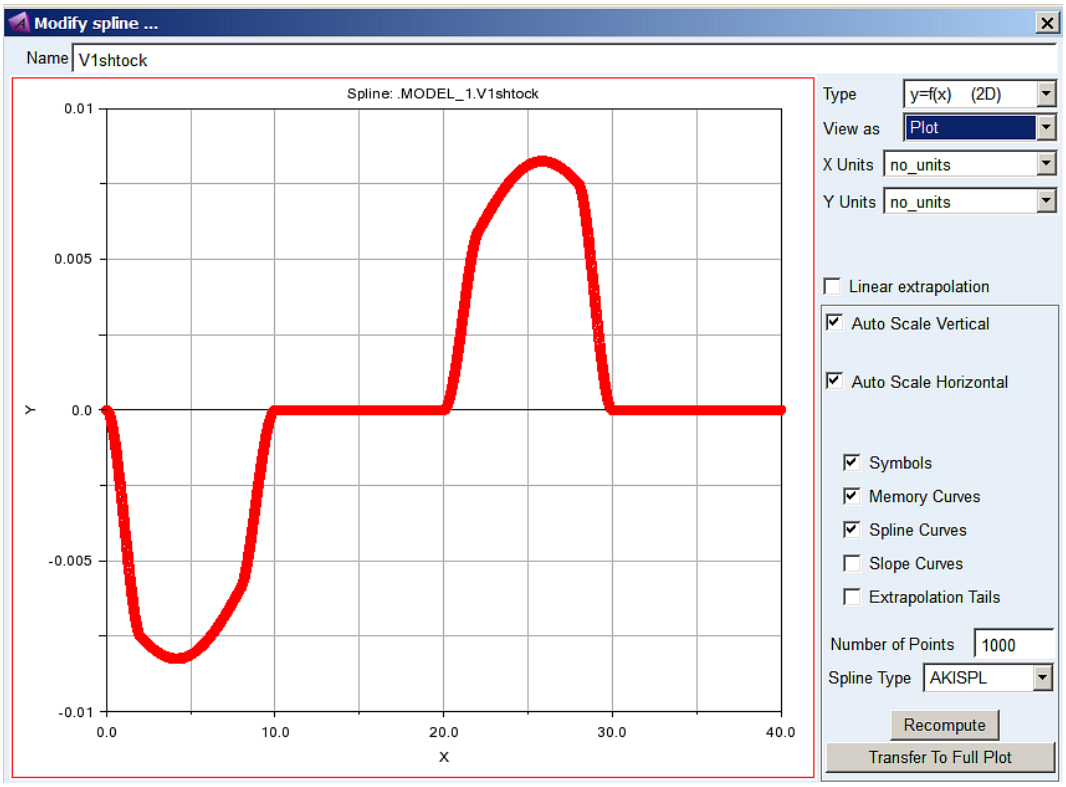


Рисунок 3 — Кубический сплайн V1shtock изменения скорости штока 1

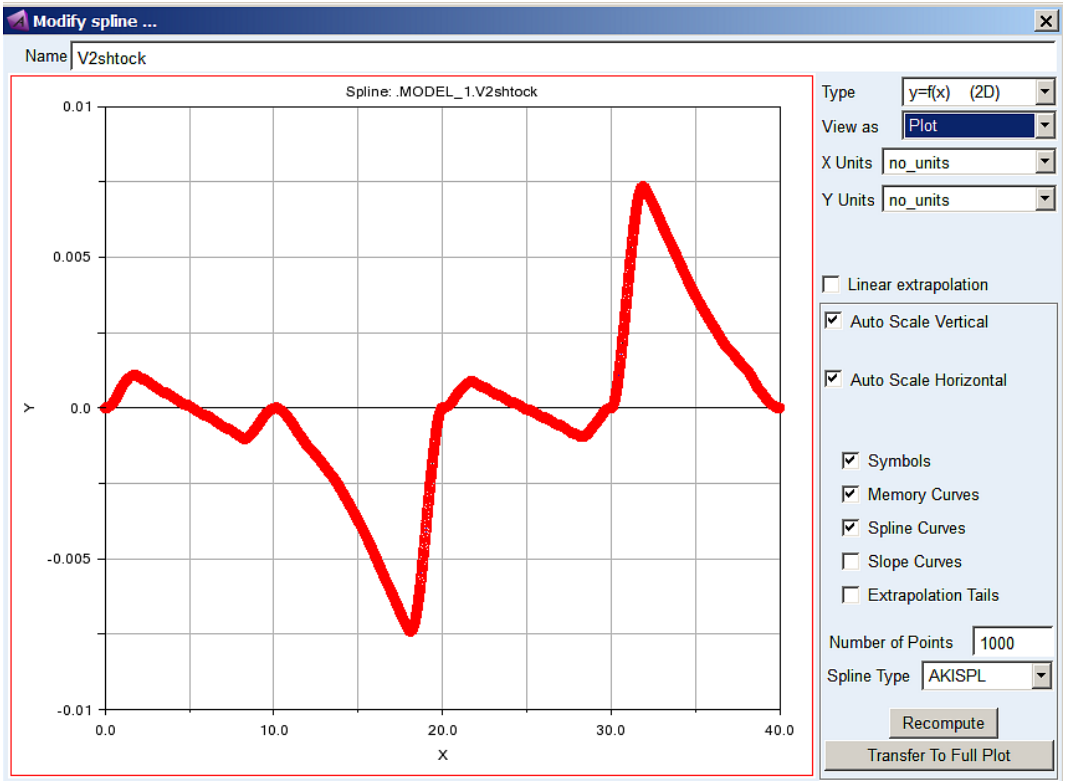


Рисунок 4 — Кубический сплайн V2shtock изменения скорости штока 2

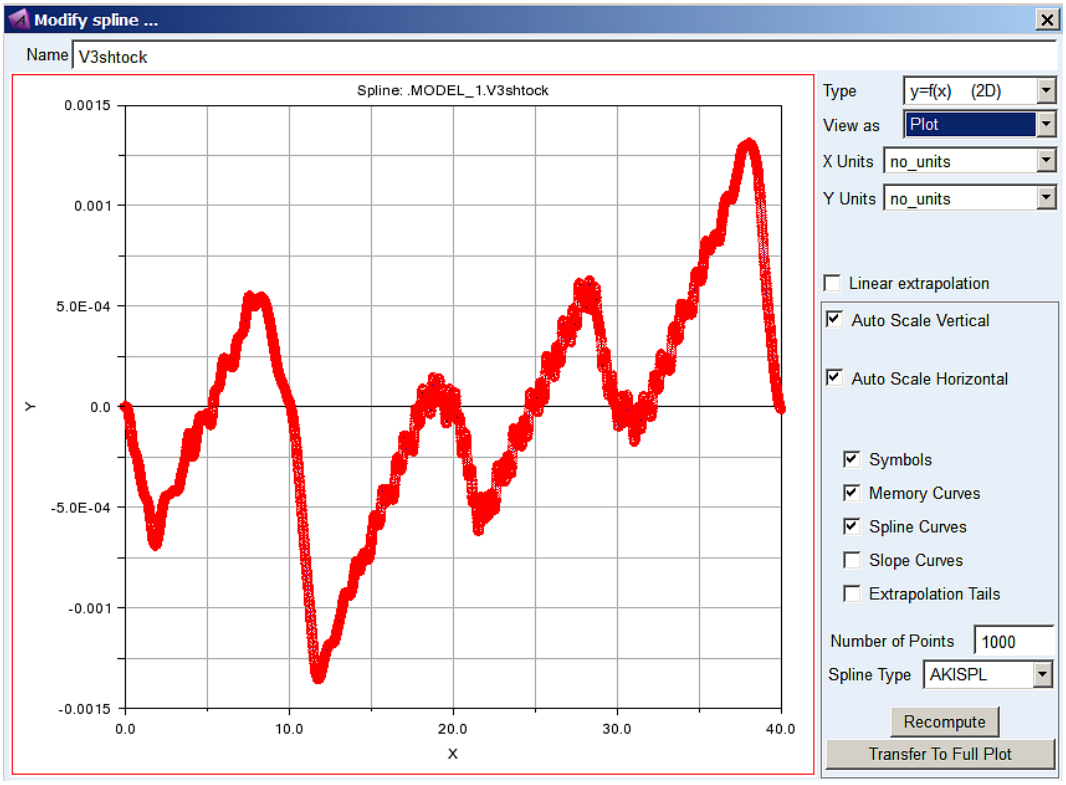


Рисунок 5 — Кубический сплайн V3shtock изменения скорости штока 3

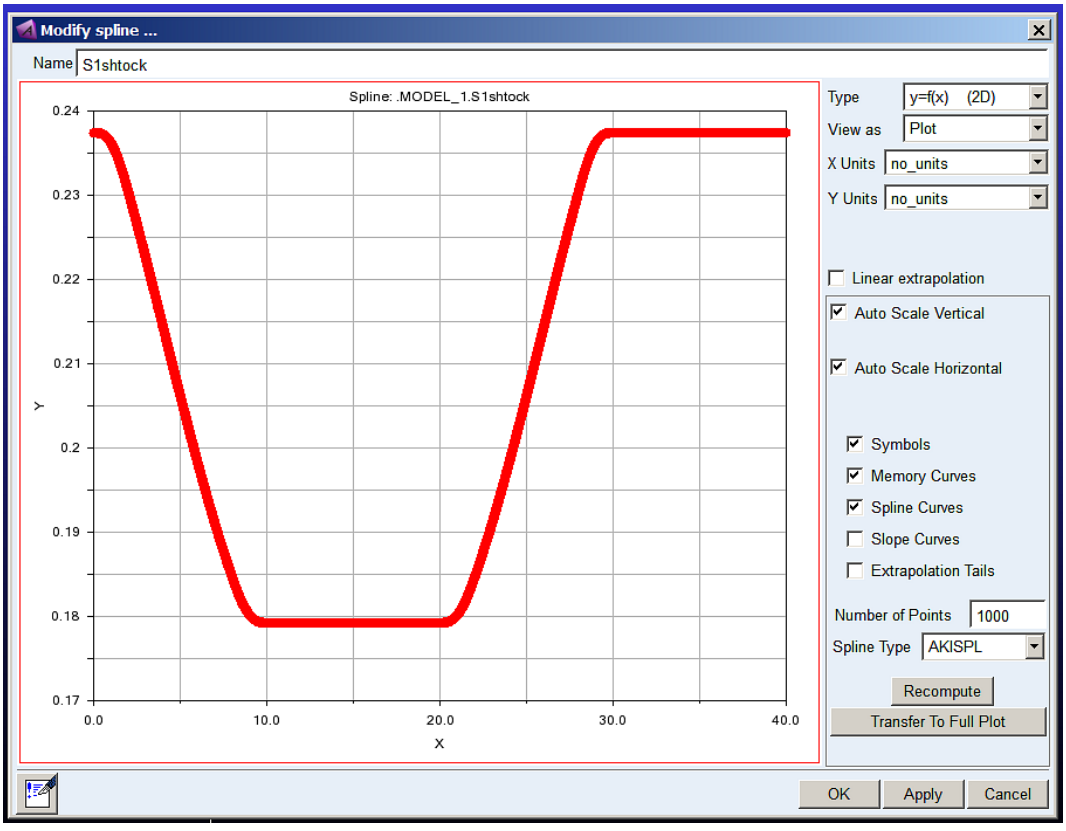


Рисунок 6 — Кубический сплайн S1shtock изменения положения штока 1

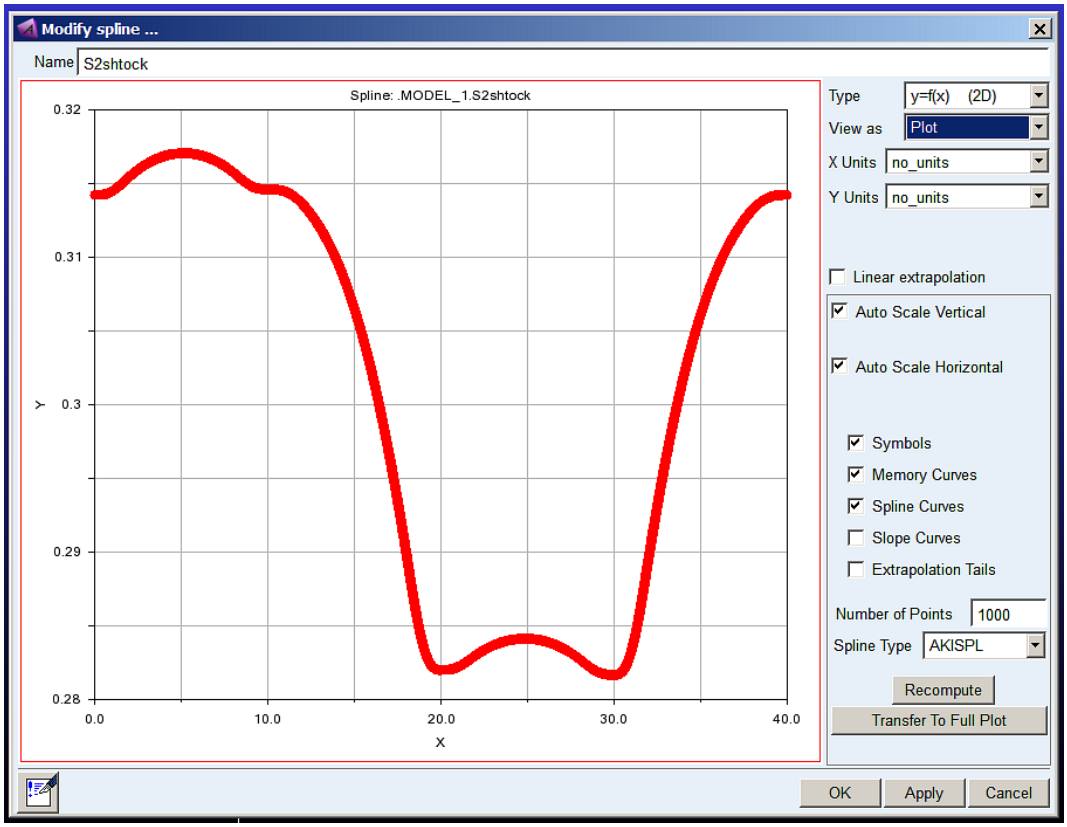


Рисунок 7 — Кубический сплайн S2shtock изменения положения штока 2

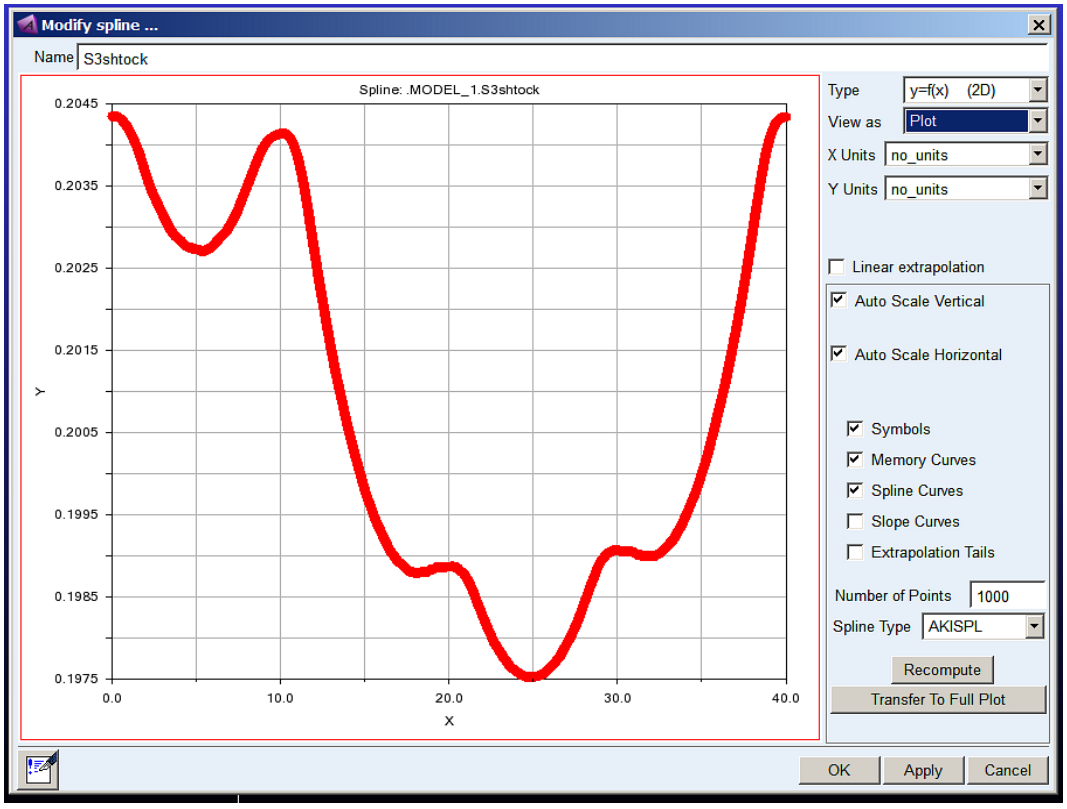


Рисунок 8 — Кубический сплайн S3shtock изменения положения штока 3

Как теперь получить управляющие силы F1, F2, F3 для регуляторов с обратными связями, работающих по ошибкам в скоростях и положениях штоков гидроцилиндров? Для их моделирования предлагается следующий способ представления этих сил, действующих на штоки, реализованный в расчетной компьютерной программе:

F1 = - K1*(VARVAL(.MODEL_1.V1)-CUBSPL(time,0,V1shtock)) -
- K1P*(VARVAL(.MODEL_1.S1)-CUBSPL(time,0,S1shtock))

F2 = - K2*(VARVAL(.MODEL_1.V2)-CUBSPL(time,0,V2shtock)) -
- K2P*(VARVAL(.MODEL_1.S2)-CUBSPL(time,0,S2shtock)) (7)

F3 = - K3*(VARVAL(.MODEL_1.V3)-CUBSPL(time,0,V3shtock)) -
- K3P*(VARVAL(.MODEL_1.S3)-CUBSPL(time,0,S3shtock)) .

Здесь F1, F2, F3 - величины управляющих сил, действующих на штоки гидроцилиндров; K1, K2, K3 - величины коэффициентов управления регуляторов по ошибкам в скоростях штоков; K1P, K2P, K3P - величины коэффициентов управления регуляторов по ошибкам в смещениях штоков; V1shtock, V2shtock, V3shtock - заданные законы изменения скоростей штоков, оформленные в виде кубических сплайнов по времени; S1shtock, S2shtock, S3shtock - заданные законы изменения положений штоков, оформленные в виде кубических сплайнов по времени; V1, V2, V3 - измеряемые законы изменения скоростей штоков в процессе численного моделирования динамики движения; S1, S2, S3 - измеряемые законы изменения положения штоков в процессе численного моделирования динамики движения.

Наилучшие значения коэффициентов K1, K2, K3, K1P, K2P, K3P - подбираются в серии численных экспериментов. Для численного интегрирования уравнений динамики используется встроенный метод интегрирования WSTIFF с шагом h = 0.01 сек.

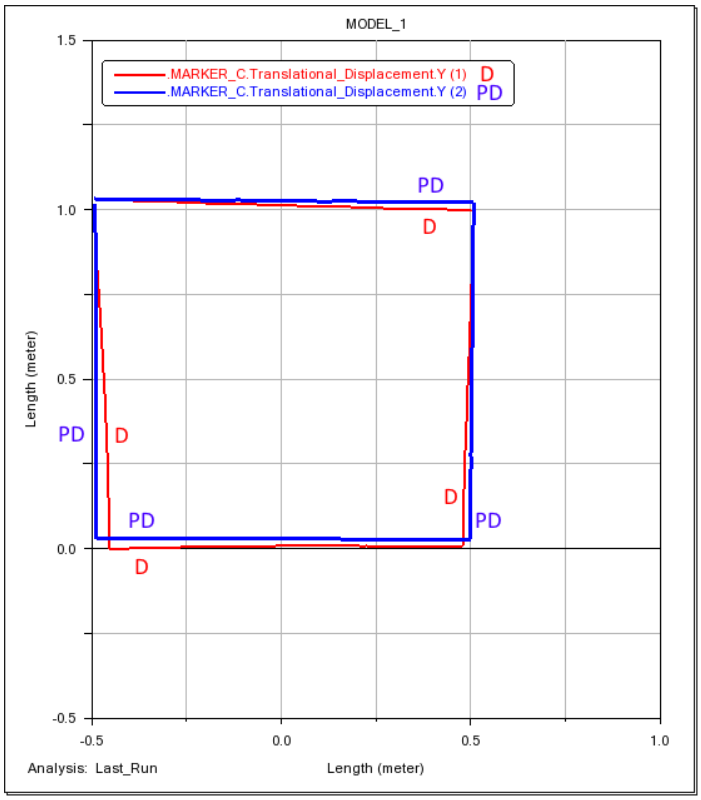


Рисунок 9 — Сравнительные кривые плоского движения захвата с грузом при D и PD управлениях

Результаты численных экспериментов

1. Вначале было промоделировано управляемое движение по общим формулам (7), для наиболее простого дифференциального регулятора с обратной связью (D). В этом случае существуют только коэффициенты общих уравнений регулятора по скорости: то есть коэффициенты K1, K2, K3 ≠ 0, а коэффициенты управления по положению штоков принудительно полагаются равными нулю K1P = K2P = K3P = 0. После ряда численных экспериментов были определены значения K1, K2, K3, обеспечивающие наилучшую точность управления в случае этого регулятора (то есть дающие наилучшее повторение формы и размеров заданного квадрата перемещения захвата с грузом на рис.2):

$$K1 = K2 = K3 = 4 \cdot 10^8 \left[\frac{Н \cdot сек}{м}\right] . \quad (8)$$

Получившаяся траектория движения схвата (D-красная кривая) представлена ниже на рисунке 9.

2. Затем было промоделировано управляемое движение по формулам (7) для общего пропорционально-дифференциального регулятора с обратной связью (PD). В этом случае существуют как коэффициенты общих уравнений регулятора по скорости K1, K2, K3 ≠ 0, так и коэффициенты управления по положению штоков K1P, K2P, K3P ≠ 0. После ряда численных экспериментов здесь также были определены свои значения K1, K2, K3, K1P, K2P, K3P, обеспечивающие наилучшую точность управления в этом случае, дающие наилучшее повторение формы и размеров заданного квадрата на рис. 2):

$$K1 = K2 = K3 = 3\cdot10^{8}$$

$$K1P = K2P = 3\cdot10^{8} \qquad \left[\frac{H}{м}\right] \qquad (9)$$

$$K3P = 3\cdot10^{4}$$

Получившаяся траектория движения захвата (PD-синяя кривая) представлена ниже, также на рисунке. 9.

Выводы

В результате сравнения траекторий плоского движения захвата в обоих случаях, показанных на рисунке 9, можно сделать определенный вывод о преимуществе в точности управления (по реализации заданного квадрата движения захвата с грузом) в случае именно расширенного, пропорционально-дифференциального регулятора с обратной связью (PD-синяя кривая). Поэтому, в результате исследования с учетом всех основных действующих сил на модель манипулятора - можно рекомендовать использовать именно PD регулятор для управления движением этим подводным манипулятором.

Литература

1. Е.Н. Пантов, Н.Н. Махин, Б.Б. Шереметов. Основы теории движения подводных аппаратов. Ленинград. «Судостроение». 1973. -216 с.
2. В.В. Рождественский. Динамика подводной лодки. Ч. 1. Ленинград. «Судостроение». 1970. -352 с.

Информация об авторе

Леонтьев Виктор Анатольевич, к.ф.-м.н., с.н.с., Государственный научный центр Российской Федерации «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики» (ГНЦ РФ ЦНИИ РТК), Россия, Санкт-Петербург, 194064, Тихорецкий пр., 21, vleont@rtc.ru, ORCID: 0000-0002-4138-1386

Синтез алгоритмов управления биоморфным подводным роботом с использованием концепции вложенных моделей

Д.К. Серов✉, Н.П. Коренко, Е.Ю. Смирнова
Государственный научный центр Российской Федерации «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики» (ГНЦ РФ ЦНИИ РТК), Санкт-Петербург, Россия, d.serov@rtc.ru

Аннотация
Проведено исследования возможности синтеза алгоритма управления движением биоморфных подводных роботов (БПР) различного типов плавания с использованием концепции вложенных моделей. Рассмотрен ряд гидродинамических математических моделей БПР различных конструкций с осцилляторным и ундуляторным типами плавания. Разработаны кибернетические модели, позволяющие осуществлять упрощенное математическое моделирование управляемого движения биоморфных подводных роботов. На кибернетических моделях движения БПР проведен синтез регуляторов базовых координат, позволяющих выполнять типовые операции поведения с использованием рассмотренных геометрических конструкций БПР. Выявлены проблемные вопросы управления движением БПР и сформулированы перспективные направления их развития.

Ключевые слова
Биоподобный подводный робот, БПР, туниморфный робот, осцилляторное плавание, ундулляторное плавание.

Благодарности
Результаты получены в рамах выполнения государственного задания № 075-00697-24-00 от 27.12.2023 г. Исследование путей создания и областей возможного применения биоморфных подводных роботов FNRG-2022-0013 1021060307689-7-1.2.1;2.2.2.

Synthesis of algorithms for motion control of biomorphic underwater robot in accordance with the concept of nested models

Danila K. Serov✉, Nikita P. Korenko, Ekaterina Yu. Smirnova
Russian state scientific center for robotics and technical cybernetics, St. Petersburg, Russia, d.serov@rtc.ru

Abstract
The study of the possibility of biomorphic underwater robots (BUR) motion control design using the concept of nested models is carried out. A number of hydrodynamic mathematical models of BUR with oscillatory and undulatory types of swimming are considered. Cybernetic models which allow a simplified mathematical dynamics modeling of the controlled motion of biomorphic underwater robots are developed. Based on the cybernetic models of BUR motion basic coordinate controllers' development is implemented, allowing typical behavioral operations to be performed using considered geometric structures of the GUR. Problematic issues of BUR motion control are identified and promising directions for their development are formulated.

Key words
Biomorphic underwater robot, BUR, tunimorphic robot, oscillatory swimming, undulatory swimming.

Acknowledgements
Results were obtained as part of the implementation of state assignment № 075-00697-24-00 dated 27 December, 2023. Study of ways of creation and areas of possible application of biomorphic underwater robots FNRG-2022-0013 1021060307689-7-1.2.1;2.2.2.

Введение

Одним из перспективных направлений подводной робототехники в настоящий момент является применение биоподобных подводных роботов (БПР), в частности, для работы в крупных промышленных акваториях [1]. Использование биоинспирированных движителей при выполнении технологических операций позволяет данным роботам минимизировать вред, наносимой экосистеме, что является значительным преимуществом перед классическими подводными аппаратами с винтовыми движителями.

Одним из ключевых этапов проектирования БПР является разработка системы управления с учетом ограничений, накладываемых биоинспирированными движителями. При этом данный процесс осложняется как

нестационарным характером водной среды, так и сложностью математического описания динамики движения БПР. Несмотря на то, что существуют различные подходы к аналитическому описанию динамики БПР [2],[3] сильное различие в геометрической форме и составе комплекса биоморфных роботов ведет к тому, что валидность данных моделей для каждого конкретного робота приходится рассматривать в отдельности. Разработка аналитической модели, особенно для тел со сложной геометрией, может потребовать значительных вычислительных ресурсов или существенных упрощений модели, что увеличивает время на её создание и снижает точность конечного результата.

В данной работе в качестве альтернативы существующим подходам рассмотрена возможность синтеза алгоритма управления движением БПР с использованием концепции вложенных моделей, показавшей свою эффективность при разработке алгоритмов управления применительно к классическим подводным роботам [4]. Суть концепции вложенных моделей заключается в проведении численных экспериментов с целью получения значений идентификационных динамических параметров объекта, производя расчёты на гидродинамической сеточной модели, позволяющей наиболее точным образом описать особенности геометрии конкретного робота. Эксперименты, проводимые на гидродинамической модели, позволяют определить переходный процессы и параметры передаточных функций, описывающих динамику объекта управления при ступенчатом управляющем воздействии на систему. На практике, для первичной разработки и отладки алгоритмов управления предложено использовать кибернетические модели [5], описывающие динамику робота при выполнении каждой из типовых операций поведения упрощенно, в виде звеньев классической теории автоматического управления. Полученная модель достаточно точно описывает реакции объекта на различного рода возмущающие воздействия, что позволяет использовать данные модели для синтеза регуляторов и определения параметров системы управления.

По результатам проведенных математических экспериментов выявлены основные достоинства и недостатки использования концепции вложенных моделей при синтезе алгоритмов управления БПР. Определены основные ограничения и проблемные вопросы использования данной методики применительно к БПР осцилляторного и ундулляторного типов.

Описание методики проектирования системы управления

Синтез алгоритмов управления движением БПР осуществлялся в соответствии с предложенной в ЦНИИ РТК [6] методики модель-ориентированного проектирования системы управления, заключающейся в следующем:

На первом этапе выполняется разработка численной математической модели движения БПР, гидродинамика жидкости в которой описывается с использованием уравнений Навье-Стокса [7] для каждой из частиц жидкости, моделируемых в узлах сетки расчетной области. Основное преимущество данных моделей заключается в том, что они наиболее точно позволяют моделировать гидродинамическое воздействие жидкости на БПР, что особенно важно при математическом моделировании сложных движений, выполняемых с использованием биоподобных или биоинспирированных движителей. При этом для создания данных моделей не нужно определять гидродинамические параметры объекта управления, такие как коэффициенты гидродинамического сопротивления и присоединенные массы, а достаточно знания о массоинерционных характеристиках БПР. Тем не менее, данные модели обладают низким быстродействием, в связи с чем проводить настройку параметров регуляторов на основании результатов моделирования на гидродинамических моделях не представляется целесообразным.

В связи с этим в соответствии с приведенной методикой проектирования предлагается провести ряд идентификационных испытаний на численной гидродинамической модели с целью разработки так называемых кибернетических моделей, позволяющих моделировать динамику объекта управления без учета его физических особенностей, т. е. исключительно в терминах теории автоматического управления. Математические модели данного типа обладают высоким быстродействием, что позволяет проводить на них синтез алгоритмов управления движением БПР, в том числе и с использованием методов оптимизации.

Общий вид кибернетических моделей приведен на рисунке 1.

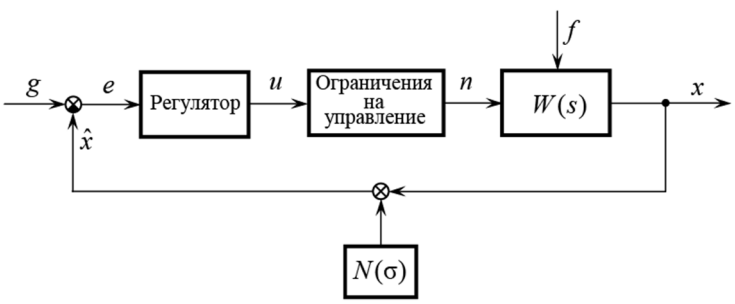


Рисунок 1 — Структурная схема кибернетической модели БПР

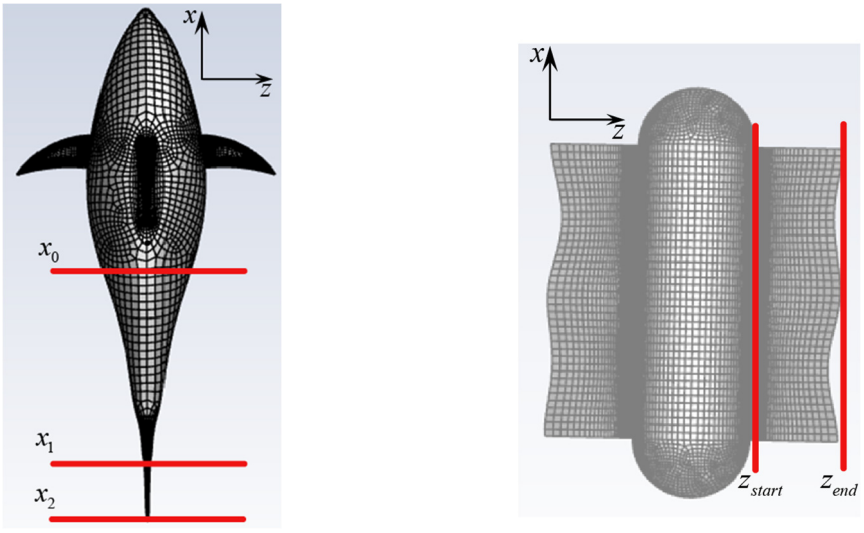
Обозначения, используемые на рисунке 1: g – заданное значение управляемой координаты, e – ошибка регулирования, u – управляющее воздействие, определяемое регулятором, n – фактическое управляющее воздействие, подаваемое на объект управления, f – возмущающее воздействие, подаваемое на объект управления, $W(s)$ – передаточная функция, характеризующая динамику объекта управления, $N(\sigma)$ – нормальное распределенное стохастическое воздействие со среднеквадратичным отклонением σ и нулевым математическим ожиданием, характеризующее погрешности измерения, x – вектор состояния объекта управления, $\hat{x}$ – наблюдаемое значение вектора состояния объекта управления.

Таким образом, кибернетическая модель в общем случае помимо ограничений на управления позволяет учесть принципиально важные при проектировании системы управления возмущающие факторы, такие как погрешности измерений, а также внешние силовые воздействия, например, в результате воздействия течения. Тем не менее, в рамках данной работы рассматривается только принципиальная возможность проектирования системы управления движением БПР различных типов плавания, не привязанная к особенностям измерительного комплекса конкретного робота, а связанная непосредственно с особенностями биоподобного движителя, реализующего данный тип движения. Далее на основании упрощенных кибернетических моделей осуществляется синтез алгоритма управления. В случае с биоподобными роботами, алгоритм управления подразумевает изменение одного из параметров паттерна движения БПР, позволяющего ему реализовать тот или иной тип плавания.

На заключительном этапе разработки алгоритма управления движением БПР выполняется его апробация на гидродинамической модели движения, наиболее точно позволяющей осуществлять математическое моделирование гидродинамики. Тем самым обеспечивается так называемая вложенность моделей: кибернетическая модель создается на основании гидродинамической модели, а затем апробация регуляторов, разработанных на основании кибернетической модели, осуществляется на примере управления движением гидродинамической модели БПР.

Описание рассматриваемых конструкций БПР

В ходе выполнения данной работы рассматривалось две принципиально разные по своим геометрическим особенностям и способам движения конструкции БПР, представленные на рисунке 2.



а) **б)**

Рисунок 2 — Модель БПР с осцилляторным (а) и ундуллятором (б) типами плавания

Обозначения, используемые на рисунке 2: x_0 – продольная координата начального участка деформации хвоста туниморфного БПР, x_1 – продольная координата начального участка деформации хвостового плавника туниморфного БПР, x_2 – продольная координата конечного участка деформации хвостового плавника туниморфного БПР, z_{start} – поперечная координата начального участка деформации бокового плавника ундуляторного БПР, z_{end} – поперечная координата конечного участка деформации бокового плавника удуляторного БПР.

Робот с осцилляторным типом плавания туниморфного типа (рис. 2 (а)) может осуществлять перемещение в продольном направлении путем колебания хвостовой части по следующему синосуидальному закону движения:

$$\begin{cases} z(x,t) = A(x_0 - x)^2 \sin(2\pi\nu t), \quad x_0 \geq x \geq x_1 \\ z(x,t) = A(x_0 - x_1)^2 \sin(2\pi\nu t) - A_2(x_1 - x)\cos(2\pi\nu t + \Delta\varphi), \quad x_2 \geq x \geq x_1 \end{cases} \tag{1}$$

где A, A_2 – параметры, характеризующие амплитуду колебаний хвоста и хвостового плавника БПР соответственно, ν – частота колебаний хвостовой части БПР, t – время с начала колебательного процесса, x – координата хвостовой части плавника, $\Delta\varphi$ – разность фаз между колебаниями хвостового плавника и хвоста БПР, z – поперечная координата хвостовой части плавника.

Таким образом, в качестве основных параметров, влияющих на характер движения БПР можно выделить коэффициенты, характеризующие амплитуду колебаний, а также угловую частоту колебаний и фазовый сдвиг колебаний хвостового плавника и хвоста туниморфного БПР. Меняя данные параметры, БПР с осцилляторным типом плавания способен осуществлять управляемое движение в продольном направлении, с возможностью плавной регулировки угла курса путем изменения плоскости колебаний хвостовой части. Тем не менее, данная конструкция обладает принципиальными недостатками, заключающимися в невозможности выполнения операции «танкового разворота», т. е. операции разворота при отсутствии движения по линейным координатам. Также данная конструкция не позволяет эффективно осуществлять торможение в связи с отсутствием возможности у движителя осцилляторного типа создать тягу в обратном направлении.

По этой причине нами также была рассмотрена конструкция, позволяющая осуществлять ундуляторный тип плавания (рис. 2 (б)) путем создания бегущей волны на боковых плавниковых движителях при их колебании по синусоидальному закону в соответствии со следующей формулой:

$$\begin{cases} \Delta y_R = A_R \cdot (z - z_{start}) \cdot \sin(2\pi\nu_R t + K_R x), \ z_{start} \le z \le z_{end} \\ \Delta z_R = (z - z_{start}) \cdot (\cos(\operatorname{atan}(A_R \sin(2\pi\nu_R t + K_R x)) - 1)), \ z_{start} \le z \le z_{end} \\ \Delta y_L = A_L \cdot (z + z_{start}) \cdot \sin(2\pi\nu_L t + K_L x), \ -z_{start} \ge z \ge -z_{end} \\ \Delta z_L = -(z + z_{start}) \cdot (1 - \cos(\operatorname{atan}(A_L \sin(2\pi\nu_L t + K_L x)))), \ -z_{start} \ge z \ge -z_{end} \end{cases} \quad (2)$$

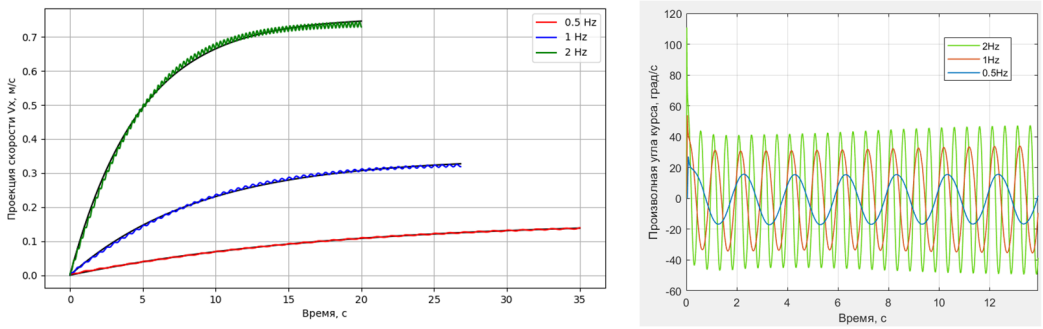
где $\Delta y_R, \Delta z_R, \Delta y_L, \Delta z_L$ – смещения точки правого и левого плавника относительно центра масс, A_R, A_L – амплитуда колебаний правого и левого плавника соответственно, x, y, z – положение точки плавника в системе координат, связанной с центром масс БПР, z_{start}, z_{end} – поперечные координаты начала и конца участка деформации плавника, ν_R, ν_L – частоты колебаний правого и левого плавников БПР соответственно, K_R, K_L – волновое число, соответствующее правому и левому плавникам соответственно.

Таким образом, при управлении БПР с ундуляторным типом плавания существует 6 параметров, влияющих на характер движения: амплитуда, частота и волновое число, соответствующее правому и левому плавникам. Несмотря на то, что данный вид движения физически сложнее реализуем, концептуально он позволяет компенсировать недостатки туниморфной конструкции за счет возможности создания силы тяги в обоих направлениях, что может быть использовано как для выполнения «танкового разворота» по углу курса, так и для торможения робота.

Синтез кибернетических моделей движения БПР

В рамках данной работы было принято решение проанализировать принципиальную возможность управления движением БПР с осцилляторным и ундуляторным типами плавания при движении в продольном направлении и повороту по углу курса.

Для этого была проведена серия экспериментов на соответствующих гидродинамических моделях с целью снятия переходных характеристик по скорости линейного движения и углового разворота по курсу для разработки кибернетических моделей движения БПР. Полученные графики изменения линейной и угловой скорости движения туниморфного БПР при изменении плоскости колебаний хвостовой части на угол $\alpha = 5°$ и различных частотах колебаний хвостовой части представлены на рисунке 3.



а) **б)**

Рисунок 3 — Графики переходного процесса по линейной и угловой скорости туниморфного БПР

Аналогичные эксперименты были проведены при $\boldsymbol{\alpha = 2°}$ и $\boldsymbol{\alpha = 7°}$. В результате проведения экспериментальных исследований можно сделать вывод, что динамика изменения угла курса туниморфного БПР носит колебательный характер, при этом движение в продольном направлении можно считать достаточно устойчивым для представленной конструкции. Таким образом, динамика движения БПР по линейной координате может быть описана в виде нелинейного аналога инерционного звена первого порядка

$$W(s, v) = k(v)/(T(v)s + 1) \quad (3)$$

где $W(s, v)$ – передаточная функция; $k(v), T(v)$ – нелинейно определенные параметры передаточной функции, выраженные в виде полинома второго порядка; $\boldsymbol{s}$ – оператор дифференцирования.

Динамика поворота по углу курса, в свою очередь, может быть представлена в виде нелинейного аналога инерционного звена второго порядка, установившаяся угловая скорость которого зависит от частоты и амплитуды колебаний хвостовой части:

$$\begin{cases} \ddot{\omega}_i = (\omega_y(\nu_i, \alpha_i) - 2\xi T\dot{\omega}_{i-1} - \omega_{i-1})/T^2 \\ \dot{\omega}_i = \dot{\omega}_{i-1} + \Delta t\ddot{\omega}_i \\ \omega_i = \omega_{i-1} + \Delta t\dot{\omega}_i \end{cases} \quad (4)$$

где ω_i – угловая скорость поворота по курсу, ξ, T – параметры аппроксимации, $\boldsymbol{\Delta t}$ – дискретность моделирования.

Графики изменения угловой скорости движения БПР с ундуляторным типом плавания при выполнении операции разворота на месте в зависимости от частоты и амплитуды колебаний боковых плавниковых движителей при создании одинаковой по модулю и противоположной по направлению бегущей волны на правом и левом плавниковых движителях приведены на рисунке 4.

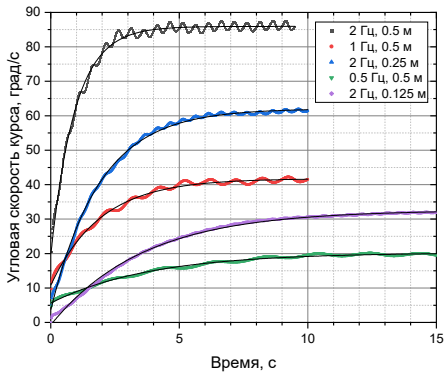


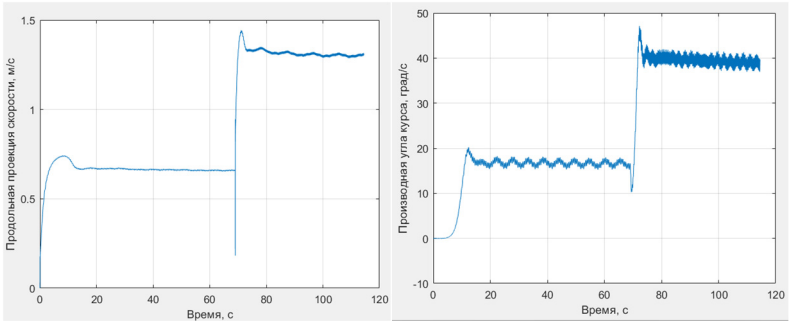
Рисунок 4 — Графики переходного процесса по угловой скорости ундуляторного БПР при развороте на месте

Исходя из полученных графиков, можно отметить, что разворот по углу курса при управлении ундуляторным БПР значительно более эффективен, чем при управлении туниморфным. При этом робот данной конструкции способен выполнять операцию разворота на месте, что является его значительным преимуществом перед рассмотренным ранее туниморфным роботом. Динамика разворота по курсу при отсутствии линейного движения может быть представлена в виде:

$$\begin{cases} \ddot{\varphi}_i = (\omega_y(\nu_i, A_i) - \omega_{i-1})/T(\nu_i, A_i) \\ \dot{\varphi}_i = \dot{\varphi}_{i-1} + \Delta t\ddot{\varphi}_i \end{cases} \quad (5)$$

где φ_i – угол курса, Δt – дискретность моделирования, ω_y – установившаяся скорость вращения по углу курса, A, ν – параметры амплитуды и частоты колебаний правого и левого плавниковых движителей.

Аналогичные эксперименты были проведены и при движении ундуляторного БПР в продольном направлении. Для этого на боковые плавниковые движители была подана одинаковая частота и амплитуда колебаний таким образом, чтобы каждый из боковых движителей создавал бегущую волну одинаковую как по модулю, так и по направлению. Тем не менее, в ходе проведения математических экспериментов было выявлено, что данное движение является неустойчивым и приводит к развороту БПР по углу курса, как это показано на рисунке 5.



а) **б)**

Рисунок 5 — Графики переходного процесса по линейной скорости (а) и угловой скорости (б) при мгновенном увеличении частоты колебаний боковых плавников с 1Гц до 2Гц в момент времени $t = 70$ с

Таким образом, было выявлено, что несмотря на теоретическую возможность движения ундуляторного БПР в продольном направлении, оно является крайне неустойчивым, в результате чего БПР начинает двигаться по кольцевой траектории с постоянной угловой скоростью, зависящей пропорционально от частоты

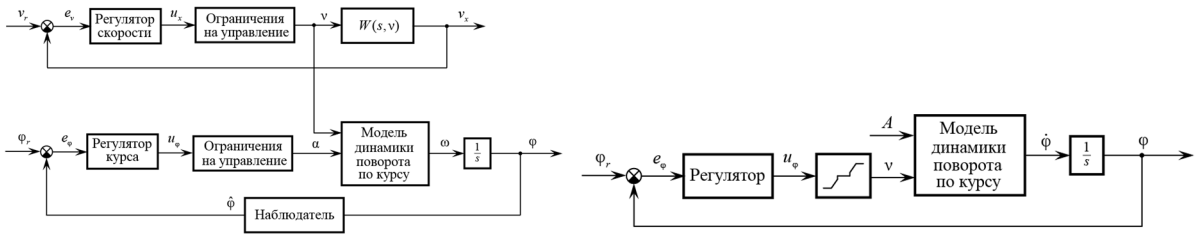
колебаний боковых плавниковых движителей. В работе [7] данный эффект был подробно проанализирован, в результате чего было выявлено, что подруливание боковыми плавниковыми движителями в процессе движения в продольном направлении также не позволяет обеспечить устойчивость движения, в связи с чем построение адекватной упрощенной одномерной модели для данного типа движения не представляется возможным.

Разработка алгоритма управления движением БПР

На разработанных кибернетических моделях движения туниморфным и ундуляторным БПР был проведен синтез алгоритмов управления при выполнении типовых операций поведения: движения в продольном направлении и плавного поворота по курсу для туниморфного БПР, и поворота по курсу при отсутствии движения для ундуляторного БПР.

В ходе построения кибернетической модели было выявлено, что для управления углом курса туниморфного БПР может использоваться угол отклонения плоскости колебаний хвостовой части относительно продольной оси симметрии БПР, при этом эффективность управления будет в значительной степени зависеть от частоты колебаний хвостовой части и линейной скорости движения БПР.

Поворот на месте для БПР ундуляторного типа, напротив, является независимым и может рассматриваться отдельно. В связи с чем системы управления движением БПР туниморфного и ундуляторного типов могут быть представлены в виде структурных схем, изображенных на рисунке 6.



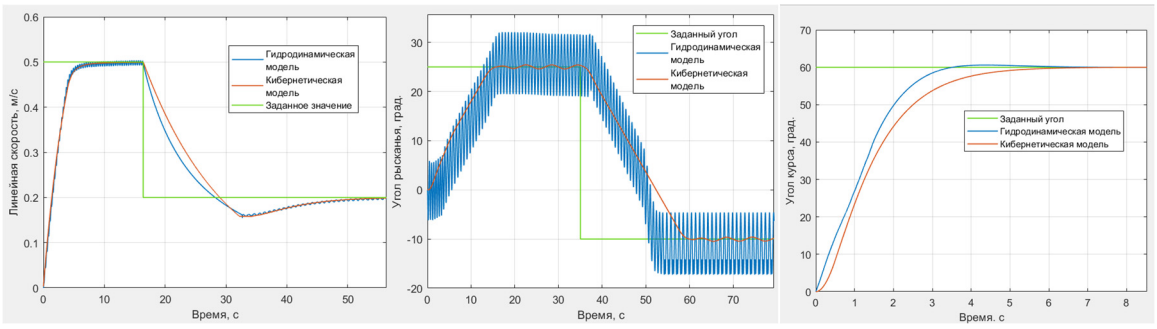
а) **б)**

Рисунок 6 — Структурные схемы системы управления движением БПР туниморфного (а) и ундуляторного (б) типов

Обозначения, используемые на рисунке 6: v_r, φ_r – заданные линейная скорость движения и угол курса, e_v, e_φ – ошибки регулирования по линейной скорости и углу курса, u_x, u_φ – управляющие воздействия регуляторов линейной скорости и угла курса.

Ограничения на управление в данных системах обусловлены как физическими ограничениями конструкций на максимально возможное изменение величины управляющих воздействий, так и наличием зоны нечувствительности управляющих устройств. При этом в связи с колебательным характером движения туниморфного БПР для управления углом курса необходим также наблюдатель, позволяющий вычислять среднее значение колебательного процесса по углу курса в ходе движения БПР. В качестве базовых регуляторов были использованы классические ПИД-регуляторы с ограничением на интегральную составляющую, равным максимально возможным управляющим воздействиям регуляторов.

Результаты математического моделирования управляемого движения БПР приведены на рисунке 7.



а) **б)** **в)**

Рисунок 7 — Результаты математического моделирования управляемого движения туниморфного БПР в продольном направлении (а) и при повороте по углу курса в движении (б), и ундуляторного БПР при повороте по углу курса на месте (в)

Заключение

Исходя из полученных результатов математического моделирования можно сделать вывод, что концепция вложенных моделей может применяться для синтеза алгоритма управления движением биоморфных подводных роботов, однако ее область ограничена устойчивыми режимами движения. Несмотря на то, что в данной работе были продемонстрированы принципиальные возможности реализации управляемого движения БПР,

существует ряд проблемных вопросов, связанных с управлением роботом с биоподобным способом движения. В частности, в подводной робототехнике существует ряд задач, требующих быстрого торможения и обеспечения позиционирования робота при движении в продольном направлении. Тем не менее, реализация быстрого торможения при туниморфном способе движения невозможна в связи с отсутствием возможности создания обратной тяги с использованием биоподобного движителя, что существенно ограничивает область применения данных роботов и список технологических операций, выполняемый ими. Данных недостатков лишена предложенная конструкция БПР с ундуляторным типом плавания, однако она не способна гарантировать устойчивость по курсу при движении в продольном направлении, что также сильно ограничивает ее область применения.

Управление углом курса туниморфного БПР возможно только в процессе его движения в продольном направлении, что является существенным ограничением рассматриваемой биоморфной конструкции и предложенного способа управления, не способной выполнить типовую операцию «танковый разворот», т.е. разворот по курсу при нулевой линейной скорости движения. В свою очередь, БПР с ундуляторным типом плавания не способен управлять углом курса при движении, но позволяет устойчиво разворачиваться по курсу на месте.

Таким образом, можно сделать вывод, что принципиальная разработка системы управления биоподобными роботами с использованием кибернетической модели движения возможна, однако сопряжена с рядом трудностей, обусловленных невозможностью точного повторения движения реальных рыб (в связи с недостаточным количеством степеней подвижности у биоморфных роботов). При этом область применения кибернетических моделей при синтезе системы управления движением БПР ограничивается исключительно устойчивыми режимами движения БПР в связи с тем, что гидродинамика при неустойчивых режимах движения настолько нелинейная, что ее невозможно с нужной точностью промоделировать на примере упрощенных моделей.

По этой причине наиболее перспективным направлением применения биоморфных роботов является не максимально точное воссоздание кинематической структуры реальных рыб, а модификация упрощенных биоморфных конструкций и компенсация их недостатков, например, путем добавления к ним классических рулевых поверхностей для управления ориентацией робота, или перехода к трансформным конструкциям, сочетающим в себе достоинства каждого из рассмотренных биоподобных способов движения. В частности, соединение в себе достоинств конструкций с ундуляторным и туниморфным типом плавания позволило бы обеспечить устойчивое прямолинейное движение, с возможностью торможения и выполнения танкового разворота, что могло бы значительно расширить диапазон применения предложенных биоподобных конструкций.

Литература

1. Zhou, Y., Wei W., Han Zh., Xingwen Zh. et al. Underwater robot coordination using a bio-inspired electrocommunication system // Bioinspiration & Biomimetics – 2022 – Vol. 17. – No. 5 – P.1-15.

2. Lighthill M.J. Large-amplitude elongated-body theory of fish locomotion//Proceedings of the Royal Society of London. Series B. Biological Sciences. – 1997. – T. 179. – N 1055. – P. 125-138.

3. Candelier F., Boyer F., Leroyer A. Three-dimensional extension of Lighthill's large-amplitude elongated-body theory of fish locomotion//Journal of Fluid Mechanics. – 2011. – Vol. 674. – P. 196-226.

4. Лопота А. В., Половко С. А, Серов Д. К., Щур Н. А. Развитие методики проектирования систем управления необитаемых подводных аппаратов с использованием концепции вложенных моделей // Материалы XIX Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления» – 2024. – С.110-117.

5. Горюнов В. В., Половко С. А., Щур Н. А. Технология создания кибернетических моделей для синтеза и отработки регуляторов системы управления движением автономного необитаемого подводного аппарата // Робототехника и техническая кибернетика – 2020 – Т. 8. – № 4. – С. 308–318.

6. Половко С. А., Попов А. В., Серов Д. К., Щур Н. А. Модельно-ориентированное проектирование систем управления движением автономных необитаемых подводных аппаратов // Системы управления, связи и безопасности – 2024 – № 3 – С. 22-48. DOI: 10.24412/2410-9916-2024-3-022-048.

7. Ламб Г. Гидродинамика / Г. Ламб – М: ОГИЗ, 1947 – 929 с.

8. K.K. Zabello, N.A. Tschur, S. Gordleeva, E.Yu. Smirnova et al. Course control in a self-consistent model of cuttlefish movement // Frontiers in Robotics and AI – Vol. 11 – 2024 – P. 1-14.

Информация об авторах

Серов Данила Константинович, инженер, Государственный научный центр Российской Федерации «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики» (ГНЦ РФ ЦНИИ РТК), Россия, 194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 21, a.pro d.serov@rtc.ru

Коренко Никита Павлович, инженер, ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Россия, 194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 21, n.korenko@rtc.ru

Смирнова Екатерина Юрьевна, заместитель руководителя научно-исследовательского центра, ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Россия, 194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 21, eus@rtc.ru

Автоматизация технологического процесса отбора и разбавления проб теплоносителя первого контура ядерного реактора

А.В. Шайтанов
Общество с ограниченной ответственностью «Вест-Инжиниринг» (ООО «Вест-Инжиниринг», Санкт-Петербург, Россия, a.shaitanov@west-e.ru

Аннотация
В данной работе анонсирован модуль отбора и разбавления проб системы аварийного и поставарийного пробоотбора теплоносителя реактора АЭС «Аккую». Отбор проб теплоносителя первого контура ядерного реактора осуществляется для проведения лабораторного анализа с целью получения информации о состоянии активной зоны реактора, реакторной установки и энергоблока в целом, для оценки потенциальной угрозы загрязнения окружающей среды при запроектных авариях, а также для принятия мер по снижению последствий запроектных аварий на АЭС на основе полученных данных. Автоматизация процесса отбора и разбавления проб теплоносителя первого контура ядерного реактора (соотношение 1:10, 1:100, 1:1000) осуществляется с целью защиты оператора от воздействия ионизирующих излучений и сокращения времени его пребывания в помещении с повышенным радиационным фоном во время аварии. Уникальность выполняемой работы заключается в отсутствии в настоящее время в России и зарубежом аналогов автоматизированных систем, позволяющих отбирать высокоактивную пробу теплоносителя реактора в условии запроектной аварии. Существующие зарубежные аналоги предполагают непосредственное участие оператора в управлении процессом отбора и разбавления пробы. Автоматизация выше обозначенного процесса реализована в виде модуля отбора и разбавления проб, позволяющего получать представительные пробы: теплоносителя из корпуса реактора (2 точки отбора); воды из аварийного приямка гермооболочки (2 точки отбора); воды из бассейна выдержки и перегрузки топлива (1 точка отбора).

Ключевые слова
Автоматизация технологического процесса, отбор проб, радиационный мониторинг.

Благодарности
Работа выполняется в рамках контракта на поставку модуля отбора и разбавления проб для энергоблоков № 1, 2, 3, 4 АЭС «Аккую», заключенного между TITAN2 IC İÇTAŞ İCŞAAT ANONİM ŞİRKETİ и ООО «Вест-Инжиниринг».

Process automation of sample dilution system of primary reactor coolant circuit

Anton V. Shaitanov
Limited Liability Company West-Engineering (LLC West-Engineering), St. Petersburg, Russia, a.shaitanov@west-e.ru

Abstract
In this paper was announced the sampling and dilution module of the Akkuyu NPP reactor coolant emergency and post-emergency sampling system. Sampling of the primary coolant of the nuclear reactor is carried out for laboratory analysis in order to obtain information on the state of the reactor core, the reactor plant and the power unit as a whole, to assess the potential threat of environmental pollution during beyond design-basis accidents, as well as to take measures to reduce the consequences of beyond-design basis accidents at nuclear power plants based on the data obtained. Automation of the process of sampling and dilution of the primary coolant of the nuclear reactor (ratio 1:10, 1:100, 1:1000) is carried out in order to protect the operator from the effects of ionizing radiation and reduce the time of his stay in a room with an increased radiation background during an accident. The performed work is unique in that in Russia and other countries there aren't any analogues of automated systems that allow taking a highly active sample of the reactor coolant in a beyond design-basis accident. Existing foreign analogues involve the operator's direct participation in the control of the sampling and dilution process. Automation of the above mentioned process is made possible by a sampling and dilution module, which allows obtaining representative samples: coolant from the reactor pressure vessel (2 sampling points); water from the containment shell pit (2 sampling points); water from fuel pool and refueling pool (1 sampling point).

Key words
Process automation, sampling, radiation monitoring.

Acknowledgements
The research is being made as a part of the contract for delivery of sampling and dilution module for power units 1, 2, 3, 4 Atomic Power Station signed by TITAN2 IC İÇTAŞ İCŞAAT ANONİM ŞİRKETİ and LLC West-Engineering.

Введение

Информация о химическом и радионуклидном составе теплоносителя первого контура ядерного реактора и его обеспечивающих систем является чрезвычайно важной для обеспечения контроля за возникновением аварийных ситуаций и ликвидации их последствий. После анализа развития аварии на АЭС «Фукусима-Дайичи» в марте 2011 года МАГАТЭ (международное агентство по атомной энергетике) в плане действий по ядерной безопасности от сентября 2011 г сформулировало требование о введении в разрабатываемые и модифицируемые АЭС систем аварийного и поставарийного анализа проб технологических сред PASS (Post-Accident Sampling System, система поставарийного отбора проб) [1].

О зарубежном опыте использования таких систем можно ознакомиться в статье [2]. В Российской Федерации работы по созданию комплекса пробоотбора начались в 2014 г. в ФГУПП «НИТИ им. А.П. Александрова» [3]. По состоянию на 2024 г ООО «Вест-Инжиниринг» является единственной компанией в России, которая производит модули отбора проб, позволяющие в автоматизированном виде производить отбор высокоактивной пробы при запроектных авариях. Упомянутые модули уже успешно эксплуатируются на Нововоронежской АЭС, Балаковской АЭС, а также сейчас выполняется отгрузка модуля отбора и разбавления проб на АЭС «Руппур» в Республике Бангладеш [4].

В данной работе анонсирован модуль отбора и разбавления проб системы аварийного и поставарийного пробоотбора теплоносителя реактора АЭС «Аккую». Представленное оборудование с одной стороны сочетает в себе уже временем проверенные схемы и решения, с другой стороны в нем был проявлен научный подход к решению проблем пробоотбора, что позволило упростить систему и увеличить ее. надежность. Также стоит добавить, что данная работа выполняется в условиях вынужденной необходимости проведения частичного импортозамещения, несмотря на то что оборудование поставляется на экспорт в Турецкую Республику.

Состав модуля отбора и разбавления проб

Модуль отбора и разбавления проб теплоносителя первого контура ядерного реактора является оборудованием системы аварийного и поставарийного пробоотбора теплоносителя реактора. Конструктивно модуль разделен на следующие блоки:

- блок охлаждения и подготовки проб;
- система охлаждения жидкости;
- блок отбора и разбавления проб;
- агрегат очистки сдувок;
- бокс пробоотбора со шлюзом для изъятия разбавленной пробы;
- контейнер для разбавленной пробы;
- тележка (биозащитная) с контейнером для транспортирования неразбавленной пробы;
- блок накопления и подачи дистиллированной воды;
- шкаф с баллонами азота;
- панель контроля и управления;
- щит распределительный;
- биологическая защита.

Структурная схема модуля отбора и разбавления проб представлена на рисунке 1.

Перечень основных автоматизированных технологических процессов необходимых для подготовки к выдаче, выдаче разбавленной или не разбавленной пробы, очистке системы после выдачи пробы:

- охлаждение пробы теплоносителя;
- понижение или повышение пробы до давления выдачи;
- заполнение мерной емкости неразбавленной пробы и ее дегазация;
- разбавление дегазированной пробы в соотношении к 1:10; 1:100; 1:1000;
- выдача неразбавленной или разбавленной пробы;
- промывка системы;
- продувка системы;
- слив бака дренажного.

Основные компоненты автоматизации, используемые в модуле отбора и разбавления проб

Технические средства:

- датчики давления (ООО НПП «Элемер»);
- анализаторы электропроводимости (АО «НПП «Автоматика»);
- датчики температуры (ООО НПП «Элемер»);
- датчики уровня (ООО НПП «Элемер»);

– расходомер (ПК «Геликон»);
– датчик-детектор радиоактивности (ООО НПП «Доза»);
– датчик влажности (ООО «ПО «ОВЕН»).

Агрегаты и механизмы:
– клапаны запорные высокого давления (ООО «РТС», актуатор производства АО «Тулаэлектропривод»);
– шаровые краны низкого давления (ООО «Вест-Инжиниринг», актуатор производства АО «СКБ СПА»);
– дроссельное устройство (ООО «Вест-Инжиниринг», актуатор REGADA);
– узел выдачи неразбавленной пробы с пневмоприводом (ООО «Вест-Инжиниринг»);
– электромагнитные запорные клапаны нормально закрытые (ООО НПП «Технопроект»);
– насосы (ООО «Завод нефтегазового оборудования – Импульс»).

Программно-технический комплекс производства ООО «Вест-Инжиниринг», контроллеры WAGO, среда разработки Codesys, панель Weintek, среда разработки EasyBuilder.

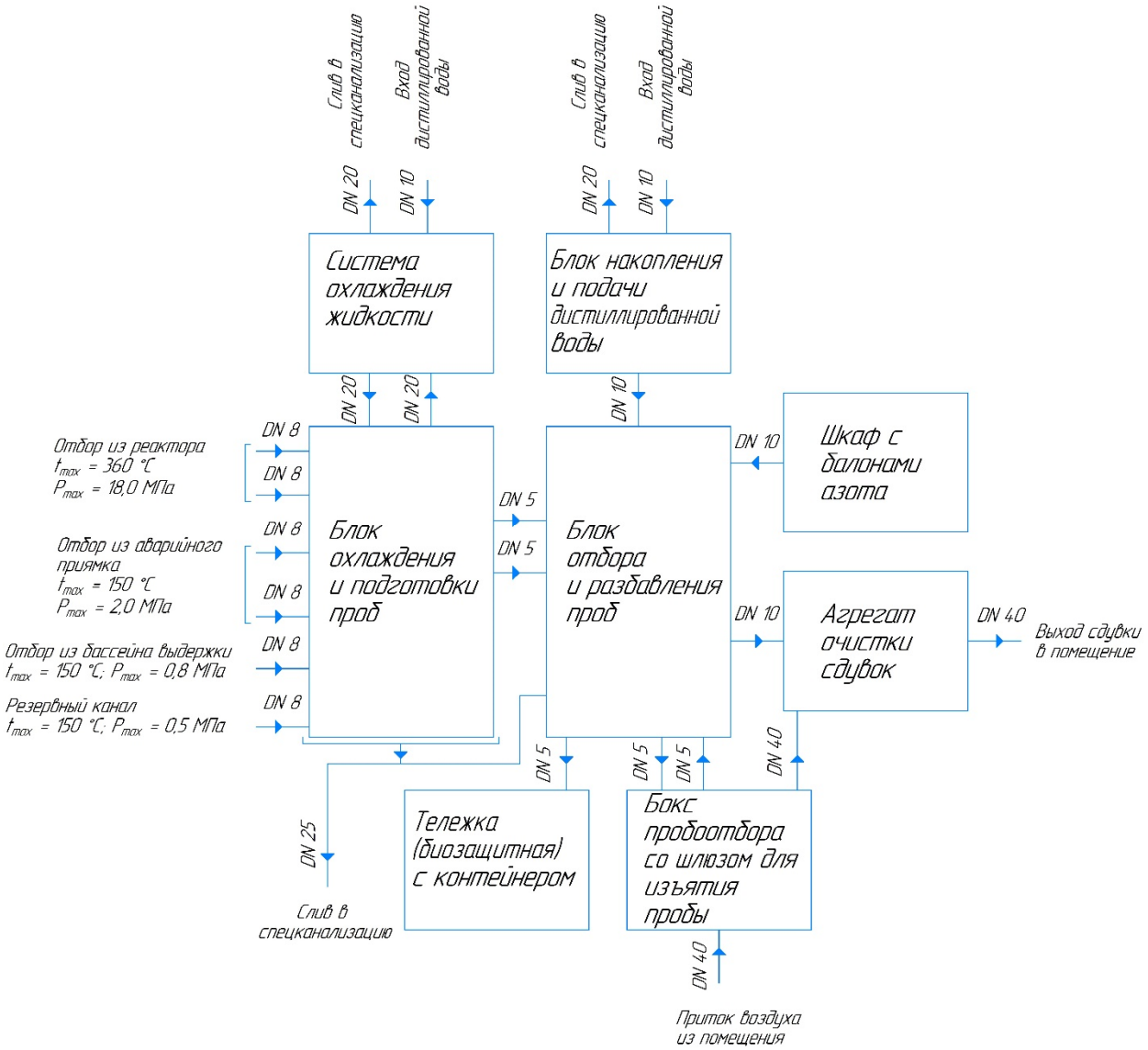


Рисунок 1 — Структурная схема модуля отбора и разбавления проб

Управление модулем отбора и разбавления проб

Панель контроля и управления обеспечивает выполнение следующих функций:
– отображение состояния качественных характеристик функционирования модуля в виде мнемосхем и таблиц параметров;
– оперативное отображение аварийных и предупредительных сообщений;
– ведение архивов параметров аварийно-предупредительных сообщений, технологических событий;
– визуализация процесса управления механизмами модуля;
– вывод результатов диагностики оборудования;
– вспомогательные функции для обслуживания системы.

Для удобства эксплуатации модуля отбора и разбавления проб теплоносителя первого контура ядерного реактора панель контроля и управления имеет сенсорный экран, позволяющий оператору получать визуальную информацию об оборудовании (режимах работы механизмов, состоянии дискретных и аналоговых сигналов системы) и посредством интерфейса программного обеспечения передавать управляющие воздействия на механизмы системы.

При включении питания на панели контроля и управления происходит автоматическая загрузка операционной системы и прикладного программного обеспечения. Панель готова к работе после появления на экране стартового видеокадра. Стартовый экран приведен на рисунке 2. Для ввода текстовой и числовой информации используется экранная клавиатура, выпадающая при нажатии оператором на поле ввода.

Рисунок 2 — Стартовый экран

Для обеспечения оперативности управления модулем сенсорный экран делится на следующие информационные зоны, представленные на рисунке 3:

1 – поле основного изображения (несет основную информацию по проекту, на ней расположены мнемосхемы, диагностические данные, сообщения, графики и т.п.);

2 – поле основной навигации (находятся основные разделы проекта: «диагностика», «сообщения», «мнемосхема», «экран управления», «параметры», «блокировки», «RUS», «ENG», кнопка для перехода на экран приветствия, текущая дата и время, текущий пользователь, кнопка смены пользователя);

3 – поле навигации второго уровня (располагаются подразделы основных разделов, кнопка активного подраздела подсвечивается тёмно-зелёным цветом);

4 – поле навигации третьего уровня (включает в себя кнопки постраничного перелистывания либо перелистывания исходя из логического деления более крупных групп экрана);

5 – поле служебной информации (данные, за которыми оператору постоянно необходимо наблюдать, строка аварийных и предупредительных сообщений).

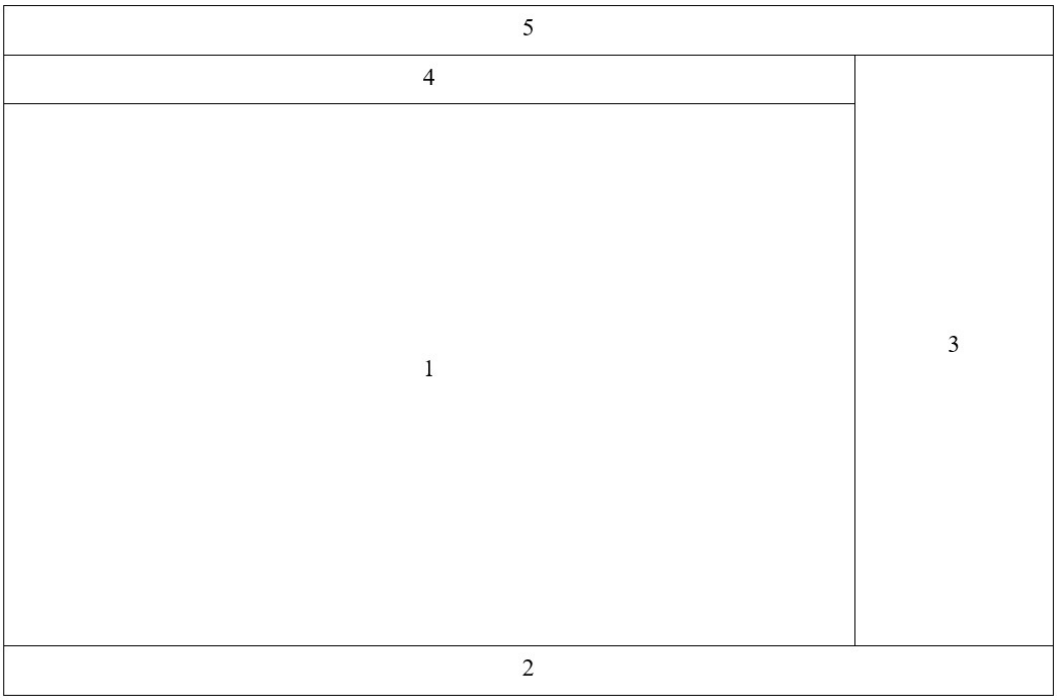


Рисунок 3 — Информационные зоны экрана

Для наглядности вышесказанного на рисунке 4 и 5 приведены примеры экранов диагностики дискретных сигналов и питания, на рисунке 6 приведен экран управления автоматизированным технологическим процессом.

Рисунок 4 — Экран диагностики дискретных сигналов

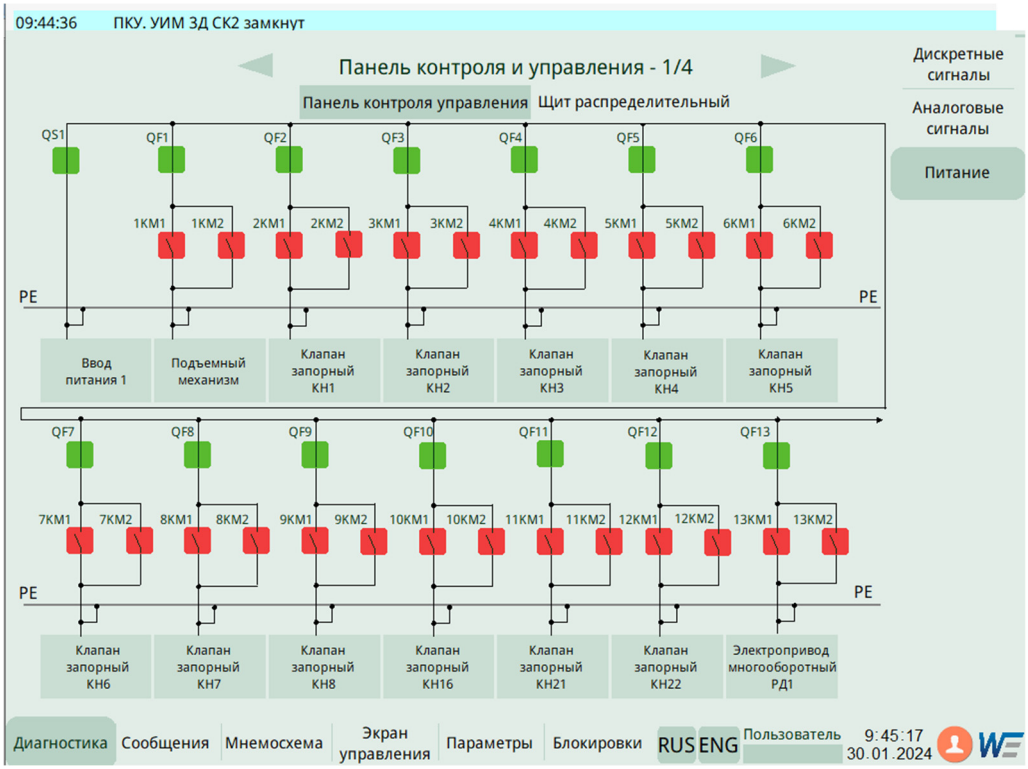


Рисунок 5 — Экран диагностики питания

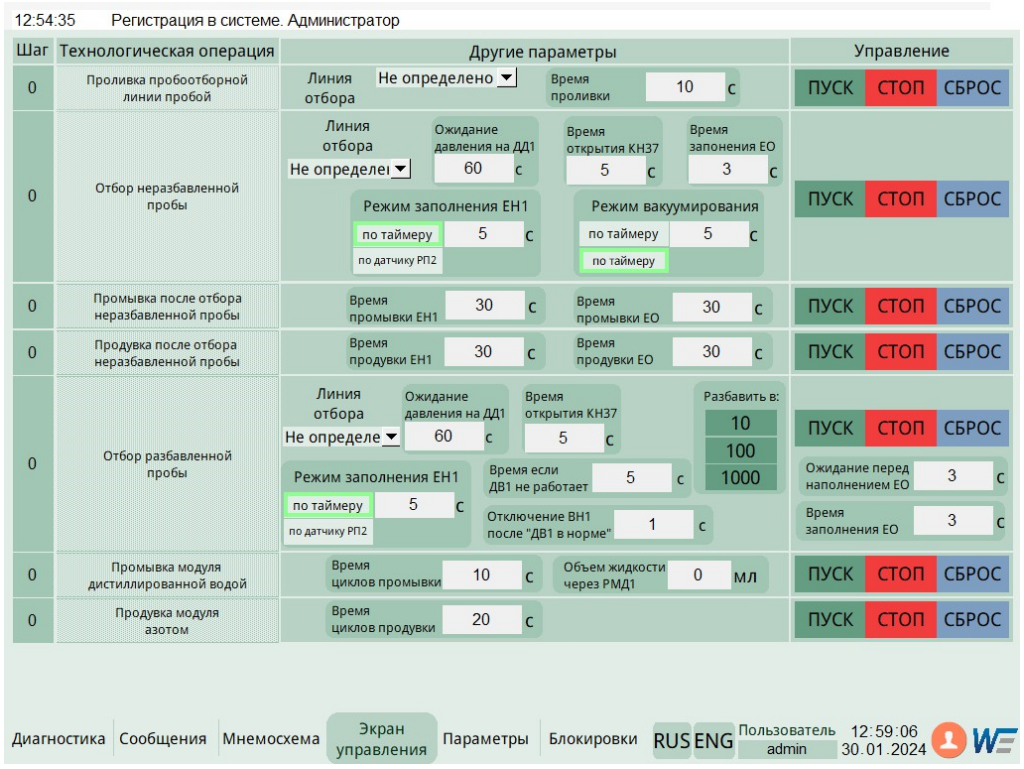


Рисунок 6 — Экран управления автоматизированным технологическим процессом

В модуле отбора и разбавления проб также предусмотрен вариант ручного управления технологическими процессами, для реализации такого управления используется раздел мнемосхема (пример экрана представлен на рисунке 7). Переход на ручной режим отбора пробы осуществляется в ситуациях, когда те или иные показатели технологических сред находятся вне предела рабочего диапазона, но не достигают критических значений, и необходимо принять следующие решения:

- продолжить процесс отбора пробы;
- остановить модуль для проведения компенсирующих мероприятий.

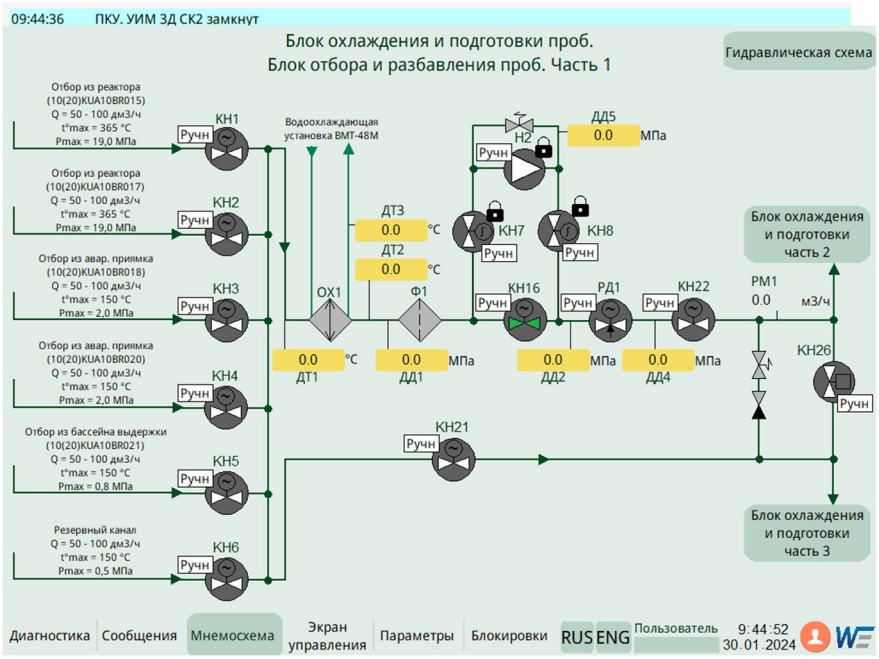


Рисунок 7 — Пример экрана раздела «мнемосхема»

На мнемосхеме представлена принципиальная технологическая схема процесса, текущие значения параметров датчиков, мнемознаки для управления механизмами изделий (трубопроводная арматура, насосы, пневмораспределители, регуляторы и др.).

Особенности человеко-машинного интерфейса

Конструкция оборудования модуля отбора и разбавления проб спроектирована таким образом, чтобы обеспечить максимальную простоту и удобство эксплуатации, технологического обслуживания и ремонта с учетом особенностей помещения атомной электростанции.

Панель контроля и управления соответствует требованиям по эргономике. Перечень основных эргономических характеристик, учитываемых при проектировании:

– читаемость надписей на лицевых панелях приборов и экране панели оператора;
– цвет и цветность элементов, подлежащих цветовому кодированию;
– яркость, контраст;
– обеспечение максимальной электро- и травмобезопасности эксплуатации, обслуживании и регламентных работах;
– наличие защиты от ошибочного действия оператора.

Органы управления расположены на панели контроля и управления для возможности управления оборудованием стоя, с учетом функционального назначения, частоты применения, последовательности использования, функциональных связей со средствами отображения информации.

Органы, управление которыми требует высокой точности и/или наиболее часто используемые персоналом, расположены в рабочей зоне 1 по [6]. Органы, управление которыми требует меньшей точности и/или менее часто используемые персоналом расположены в зонах 1 и 2 по [6]. Органы, к управлению которыми не предъявляются высокие требования точности и/или редко используемые персоналом располагаются в рабочей зоне 3 по [6].

Органы управления аварийного включения (отключения) находятся в рабочей зоне 1 по [6] и располагаются таким образом, чтобы исключить их преднамеренное включение.

Прочие требования к расположению органов управления соответствуют требованиям [7], [8].

При необходимости дублирования зрительной информации для подачи аварийных и/или предупредительных сигналов применяется звуковая сигнализация. Выбранные сигналы исключают возможность спутывания при их идентификации ухом оператора, а громкость, тон и длительность звучания определены из критериев минимизации раздражающего воздействия на человека.

Присутствует возможность ручного отключения звуковых сигналов после условия выполнения требуемого действия (в соответствии с сигналом) оператором.

Средства отображения информации расположены таким образом:

– чтобы при проведении манипуляций не быть закрытыми рукой персонала;
– чтобы не происходило искажение информации, обеспечение возможности считывания показаний без дополнительного освещения и специального оборудования.

Цветовая гамма применяемых органов индикации и управления соответствует [9].

Заключение

Конструкция основных узлов модуля отбора и разбавления проб была апробирована. Изготовлены макеты узла разбавления, узла выдачи неразбавленной пробы, дроссельного устройства высокого давления. Для подтверждения работоспособности схемы последовательного разбавления привлекался ФГБУН Институт электрофизики и электроэнергетики Российской академии наук.

По результатам работы были составлены и отправлены две заявки на изобретение в Федеральный институт промышленной собственности.

Литература

1. URL: https://www.iaea.org/ru/temy/plan-deystviy-magate-po-yadernoy-bezopasnosti (дата обращения 27.10.2024)

2. Шарафутдинов Р.Б. Зарубежный опыт нормативного регулирования и проектных решений по аварийному отбору проб на АЭС / Р.Б. Шарафутдинов, Л.Н. Харитонова. . Текст: электронный // Ядерная и радиационная безопасность. . 2012. №4. С.37. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_19100686_23978402.pdf (дата обращения: 26.10.2024). Режим доступа: Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU.

3. Вилков Н.Я. Создание системы аварийного и поставарийного отбора проб водно-водяных энергетических реакторов / Я.Н. Вилков, Д.А. Кирпиков, А.Т. Маликов, И.В. Мирошниченко, С.В. Прохоркин, О.Н. Саранча, А.А. Чертков. – Текст: электронный // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). 2019. №51.С.97103. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_42302258_44502236.pdf (дата обращения: 26.10.2024). Режим доступа: Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU.

4. URL:https://west-e.ru/solutions/productions/modul-otbora-i-razbavleniya-prob-sistemy-avariynogo-i-postavariynogo-probootbora-teplonositelya-reak/?ysclid=m1t7a2d5x4481620214 (дата обращения 01.09.2024).

5. М.Н. Молдабаева. Автоматизация технологических процессов и производств. – г. Вологда: Инфра-Инженерия, 2019 – 224 с.

6. ГОСТ 12.2.033-78. Рабочее место при выполнении работ стоя. Общие эргономические требования. = Operator's location in a standing position. General ergonomic requirements: государственный стандарт союза ССР: издание официальное: утвержден и введен в действие Постановлением Госстандарта СССР от 26 апреля 1978 г №1100: переиздание март 1986 г/ разработан Государственным комитетом СССР по стандартам – Москва: Стандартинформ. 1986. 9 с.

7. ГОСТ 12.2.061-81. Оборудование производственное. Общие требования безопасности к рабочим местам. = Industrial equipment. General safety requirements for working places: межгосударственный стандарт: издание официальное: утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 11 ноября 1981 г №4883: переиздание май 2008 г/ разработан Государственным комитетом СССР по стандартам - Москва: Стандартинформ. 2008. – 3 с.

8. ГОСТ 12.2.064-81. Органы управления производственным оборудованием. Общие требования безопасности. = Controls of industrial equipment. General safety requirements: государственный стандарт союза ССР: издание официальное: утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 11 ноября 1981 г №4884: введен впервые: дата введения 01.07.1982/ разработан Государственным комитетом СССР по стандартам – Москва: Издательство стандартов. 1982. – 6 с.

9. ГОСТ Р МЭК 60073-2000. Интерфейс человекомашинный. Маркировка и обозначения органов управления и контрольных устройств. Правила кодирования информации. = Basic and safety principles for man-machine interface, marking and identification. Coding principles for indication devices and actuators: государственный стандарт Российской Федерации: издание официальное: принят и введен в действие Постановлением Госстандарта России от 8 декабря 2000 г №348-ст: введен впервые: дата введения 2002-01-01/ разработан Техническим комитетом по стандартизации ТК 33 «Электротехника» - Москва: ИПК Издательство стандартов. 2001. – 20 с.

Информация об авторах

Шайтанов Антон Викторович, ведущий инженер-конструктор, Общество с ограниченной ответственностью «Вест-Инжиниринг» (ООО «Вест-Инжиниринг»), Россия, 197341, Санкт-Петербург, Коломяжский пр., д. 27, лит. А, a.shaitanov@west-e.ru

Цифровизация экспериментов на стендах для критических сборок

С.А. Андреев, С.Ю. Касьянов
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина», г. Снежинск, Россия, dep5@vniitf.ru

Аннотация
Ядерная промышленность является одной из самых опасных отраслей, требующей высокой степени безопасности и контроля. Для обеспечения безопасности и эффективности проведения ядерно опасных работ, необходимо использовать передовые технологии и методы, чтобы обеспечить максимальную безопасность для персонала и окружающей среды. Такой технологией является цифровизация – внедрение в производство цифровых двойников и киберфизических систем на их основе для автоматизации производственных процессов. Технологическое оборудование и системы, оснащенные датчиками, машинным зрением, цифровыми двойниками обладают повышенной точностью и надежностью в выполнении задач, особенно в условиях, когда даже небольшая ошибка может привести к серьезным последствиям. В данной работе рассматривается одно из направлений для создания безлюдного производства – цифровизация экспериментов на стендах для критических сборок.

Ключевые слова
Ядерно опасные работы, цифровой двойник, киберфизические системы.

Digital technologies for critical assembly experiments

Sergey A. Andreev, Sergey Yu. Kasyanov
FSUE «RFNC-VNIITF named after Academ. E.I. Zababakhin», Snezhinsk, Russia, dep5@vniitf.ru

Abstract
The nuclear industry is one of the most dangerous branches, demanding high degree of safety and control. For safety and efficiency of carrying out nuclear dangerous works, it is necessary to use high technologies and methods to provide the maximum safety for the personnel and environment. Such technology is digital technologies - introduction in manufacture of digital doubles and cyberphysical systems on their basis for automation of productions. The process equipment and the systems equipped with gauges, machine sight, digital doubles possess the raised accuracy and reliability in performance of problems, especially in conditions when even the small error can lead to serious consequences. In the given work one of directions for creation of deserted manufacture - digital technologies experiments at stands for critical assemblages is considered.

Key words
Nuclear dangerous works, the digital double, cyberphysical systems.

Введение

Во всем мире цифровизация является важнейшим направлением развития производств. В научной и промышленной среде под цифровизацией понимают, в том числе, внедрение в технологические процессы различных методов и информационных систем, средств автоматизированной поддержки принятия решений, обладающих интеллектуальными свойствами, называемыми «умными» решениями.

Необходимость в проведении цифровизации продиктована, прежде всего, такими глобальными факторами, как дефицит человеческих ресурсов, усложнение техники и технологий. Замена человека на “машину” позволит перераспределить освободившиеся человеческие ресурсы и перенаправить их для дальнейшей оптимизации, переосмысления и разработки еще более совершенных технологий производства. Стоит отметить, что такой труд носит, прежде всего, интеллектуальный характер и является более безопасным для человека.

Ядерно опасные работы (ЯОР) представляют собой работы с делящимся материалом, в том числе и на исследовательских ядерных установках, сопряжённые с риском образования критической массы и возникновения ядерной аварии с тяжелыми последствиями для людей и окружающей среды. Большая часть ядерно опасных операций, связанных, в том числе, с разработкой и изготовлением ядерного оружия, в настоящее время производится вручную. Имевшие место происшествия, связанные с образованием критической массы, обусловлены преимущественно, человеческим фактором.

Исключение человека и замена его техническими средствами, где это экономически и технически обосновано, не только позволит существенно повысить безопасность проводимых работ, но и откроет новые возможности за счет существенного сдвига эксплуатационных ограничений с обеспечением необходимого уровня точности и надежности.

Сложность внедрения, даже поэтапной, цифровизации ЯОР, обусловлена необходимостью совмещения двух типов моделей. С одной стороны, это традиционные инженерные модели (механические, административные и другие), а с другой — модели компьютерные (виртуальные), которые называют цифровыми двойниками. Среди причин низких темпов внедрения робототехнических комплексов в ядерные технологии можно выделить технические – высокие и специфические требования к радиационной стойкости, дезактивируемости и ментальные – консервативное профессиональное сообщество.

С учетом современного уровня цифровизации возможно создать специализированное цифротехническое направление для организации ядерно опасных работ на стендах для критических сборок — робототехнические комплексы, которые работают в неразрывной связи с цифровыми двойниками собираемых систем.

В настоящей работе рассматриваются цифровизация работ на компактных размножающих системах, собираемые на критических стендах типа ФКБН [1].

Суть цифровизации

Исключение человека из ЯОР и замена его техническими средствами, где это экономически и технически обосновано, не только существенно повысит безопасность проведения работ, производительность, но и повысит точность и надежность, а также откроет новые возможности для производства и экспериментаторов (к примеру, исследовательские ядерные установки) за счет существенного сдвига эксплуатационных ограничений.

Основными сферами цифровизации в атомной промышленности в настоящее время являются вывод из эксплуатации ядерно и радиационно опасных объектов, радиационная разведка, ремонт и дезактивация в «горячих зонах», изготовление топлива для атомных станций и переработка отработавшего ядерного топлива.

Производимый продукт (изделие) в атомной сфере, в общем случае, представляет собой, физическое объект, имеющий при работе (изготовление, хранение, транспортировка и т.п.) с ним динамично изменяющиеся параметры: геометрия, вес, ионизирующее излучение и т.п.

К примеру, при изменении массы продукта, и как следствии геометрии, за счет добавления дополнительных элементов из делящегося или конструкционного материалов происходит изменение других физических параметров, которые необходимо точно прогнозировать и учитывать для применения упреждающих мероприятий по повышению безопасности технологического процесса.

При исключении из технологической цепочки производства человека, который в первую очередь выполнял, опираясь на свой профессиональный опыт и знания, контролирующие функции, приведет к существенной потери уровня безопасности проведения работ. Эта проблема может быть решена с помощью объединения различных математических и компьютерные моделей в единую систему для получения цифрового двойника (ЦД), который позволяет всесторонне описать производимый продукт и системно подойти к разработке, производству и эксплуатации изделий.

Физические объекты и измеряемые величины

Критический стенд ФКБН – это исследовательская ядерная установка, предназначенная для проведения измерений параметров критичности размножающей системы (РС). Отличительной особенностью ФКБН является то, что на стенде собирается большое количество разных РС, при этом РС могут существенно отличаться друг от друга по конфигурации, составу и геометрии. Размножающая система содержит в себе делящиеся (уран, плутоний и др.) и неделящиеся материалы и подбирается так, чтобы в наилучшей степени смоделировать активную зону целевой системы.

РС состоит из двух пространственно и конструктивно разделенных частей: верхней неподвижной и нижней подвижной. Каждая часть составляется из отдельных деталей путем складывания или вкладывания одной в другую по заранее заданному чертежу. Верхняя часть размещается на специальной неподвижной диафрагме, закрепленной на опорной трубе, нижняя — обычно размещается на конусобразной чашке, закрепленной на подвижном штоке. Детали представляют собой диски или полусферические оболочки из делящихся (уран, плутоний и др.) и неделящихся (полимеры, металлы и др.) материалов. Размножающие системы разнообразны по конструкции и, как правило, обладают симметрией по оси подвижного штока. Вид собранной характерной размножающей системы показан на рисунке 1, ее устройство — на рисунке 2.

Сборка размножающей системы – ядерно опасная работа.

Контроль работы и дистанционное управление ФКБН осуществляются с помощью системы управления и защиты, в состав которой входит аппаратура контроля нейтронного потока и указатель положения нижней части.

В экспериментах на ФКБН основная измеряемая величина – зазор между частями размножающей системы. Процедура его определения состоит в пошаговом сближении частей РС и измерении скорости счета нейтронов.

Анализ причин аварий, имевших место на ФКБН и в целом при обращении с ДМ, показал, что в подавляющем большинстве случаев аварий является ошибка персонала – человеческий фактор. Цена такой ошибки, кроме материальных и экологических последствий, человеческая жизнь, а подчас и не одна. Отсюда следует, что одной из главных мер по повышению безопасности работ на критических стендах является замена ручных

операций роботизированными. Исключение, хотя бы частичное, человека из ЯОР является одним из эффективных способов повышения безопасности и сохранения человеческой жизни.

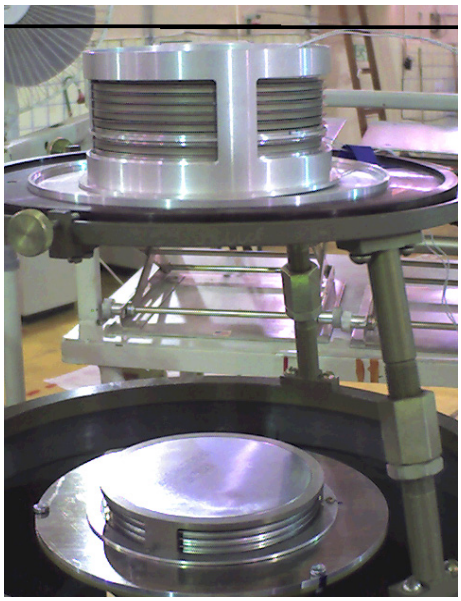


Рисунок 1 — Вид одной из размножающей системы

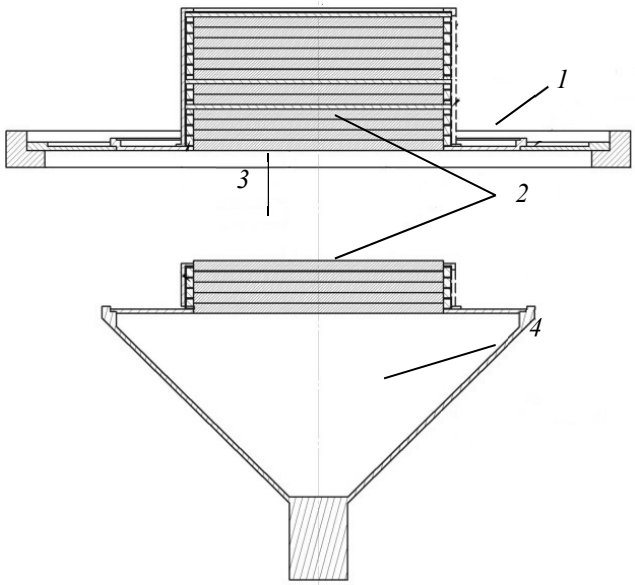


Рисунок 2 — Устройство одной из размножающих систем: 1 — диафрагма; 2 — детали из делящегося материала; 3 — зазор; 4 — конусообразная чашка

Задача цифровизации ЯОР для критических стендов исключить человека из процесса сборки РС – заменив ручную сборку РС на сборку с помощью роботехнического комплекса разработанного с применением средств обратной связи, заметная часть которых использует технологий искусственного интеллекта: технического зрения, алгоритмов автоматической разработки технологии сборки и разборки РС и цифрового двойника.

Цифровизация технологии ЯОР

Для пояснения процесса цифровизации работ на критических стендах необходимо четко представлять всю технологическую цепочку от теоретической «модели» до самого эксперимента.

I этап. Постановка задания на экспериментальное исследование, так называемой, целевой системы для получения новых данных по верификации базы нейтронных констант. Для этого задается цифровая модель РС, представляющая собой описание системы, включая ее геометрические размеры, плотность используемых деталей и их взаимное расположение.

II этап. Подбор и/или, в случае отсутствия, изготовление необходимых деталей из делящихся и конструкционных материалов, а также необходимой оснастки.

III этап. Получение цифровой копии деталей. Используемые для сборки РС детали отличаются от их идеальных моделей. Для уменьшения общей погрешности эксперимента необходимо получить максимально приближенные к реальным значения массы, габаритов, а также такие параметры как изотопный состава деталей из делящегося материала, химического состава для деталей из конструкционных материалов и оснастки.

Для получения данных о деталях необходимы: высокоточные весы (измерение массы), масс-спектрограф (определение изотопного состава), 3D-сканер (фиксация геометрических параметров).

Итогом этого этапа будут не только цифровые копии деталей, которые можно использовать в дальнейшем для проведения инвентаризации, при создании баз данных изготовленных комплектов, но и построение реалистичных моделей РС (к примеру, CAD-модели сборки РС из цифровых копий деталей), которые будут использоваться на IV этапе.

IV этап. Разработка цифрового двойника РС. В виртуальной среде цифровые двойники действуют как копии физических объектов, предоставляя информацию для принятия решений, поэтому оптимально для цифрового двойника РС использовать цифровую копию РС. Так же стоит отдельно отметить необходимость определение критериев соответствия цифровой модели РС и цифровой копии РС.

В настоящее время, уже существуют математические комплексы, которые используют метод Монте-Карло, могут производить расчеты физических параметров РС с большой точностью в реальном времени.

Одной задач по цифровизации ЯОР на критических стендах, которую необходимо будет решить — создание человеко-машинного интерфейса внесения данных о собираемой системе в формате подходящий и для робототехнического комплекса для сборки РС и математическому аппарату для расчета параметров цифрового двойника.

Сейчас, мы говорим только о цифровом двойнике для отдельной РС, но с накоплением экспериментально подтверждённых данных, появится возможность проведения «обучения» для получения универсального цифрового двойника для самых разных типов РС.

V этап. Сборка РС с помощью робототехнического комплекса с использованием цифрового двойника.

Цифровой двойник РС

Цифровой двойник представляет собой виртуальную копию физического объекта и процессов, происходящих в этом объекте. Этот "близнец" собирает информацию и использует математическое моделирование на основе законов физики, чтобы создать насыщенную данными "живую" модель объекта. Такой подход позволит проводить виртуальное моделирование и анализ процессов в системе без необходимости прямого воздействия на реальные объекты, что в контексте ядерной безопасности представляет собой значительный шаг вперед.

Применительно к РС, собираемым на критических стендах, при изменении массы системы, за счет добавления дополнительных элементов из делящегося или конструкционного материалов происходит изменение других физических параметров, которые необходимо с достаточной точностью прогнозировать и учитывать для применения упреждающих мероприятий по повышению безопасности технологического процесса.

В идеальном случае, цифровой двойник РС представляет собой «черный ящик», на вход которого экспериментатор загружает цифровую модель РС. Цифровой двойник РС должен, используя методы математического моделирования, проверить возможность собираемости такой системы и оперативно выдавать информацию, соответствующую текущему состоянию реально собираемой системы на каждом этапе сборки РС, что и будет использоваться при реальной сборке системы робототехническим комплексом.

Важным аспектом практического применения является использование цифровых двойников для обучения и тренировки персонала. Реалистичные модели ядерных объектов и процессов позволяют проводить тренировки в виртуальной среде, обучая персонал действовать в соответствии с установленными инструкциями алгоритмами и грамотно реагировать на различные аварийные ситуации, минимизируя риски для работников и объектов.

Цифровые двойники могут быть использованы для моделирования различных сценариев ядерных аварий и разработки планов эвакуации и ликвидации последствий. Это позволяет предвидеть и анализировать потенциальные угрозы заранее и разрабатывать наиболее эффективные меры по их предотвращению.

Учитывая специфику цифровых двойников в ядерной отрасли, необходимо уделить внимание вопросам кибербезопасности, обеспечивая защиту созданных цифровых двойников от взлома и несанкционированного доступа.

Киберфизическая система по сборке РС

Термин киберфизическая система (КФС) предложен для обозначения автоматизированных комплексов, состоящих из объектов различного функционального назначения и управляющих контроллеров, объединяемых в единое целое. Основой является заложенный в систему управления ЦД, обеспечивающий эффективную работоспособность физического актива как комплекса объектов мониторинга и контроля. Базовыми целями ЦД являются прогнозирование и предупреждение о возникновении условий, которые потенциально могут снизить производительность, эффективность или качество производства. Это означает, что КФС должна вести себя так же, как человек с опытом выполнения определенного процесса, т.е. определять причины и последствия отклонения от нормального выполнения процесса.

Применительно к цифровизации работ на критических стендах - КФС единственно возможный вариант робототехнического комплекса для сборки РС.

КФС для сборки РС это:

– манипулятор, обеспечивающий точное перемещение деталей РС от места размещения до соответствующего места в сборке;

– захватный модуль, обеспечивающий безопасный захват и переноску деталей;

– система машинного зрения, которая с применением нейронных сетей обеспечивает поиск, обнаружение дефектов и оценку геометрических отклонений деталей и собираемой РС;

– система оперативного контроля параметров РС, таких как нейтронный поток и температура, и проверка на соответствии реальных физических величин цифровому двойнику РС;

– цифровой двойник РС, обеспечивающий прогнозирования поведения реальной РС, что позволит оптимизировать операции по сборке системы и предотвращения возможных аварий и отклонений от технологического процесса;

– рабочее место оператора для проведения визуального контроля над процессом работы КФС, верификации 3D-модели и формирования исполняемых задач.

Цифровизация экспериментов на стендах для критических сборок

Всю работу на стенде с деталями РС выполняет КФС, неотъемлемой часть которого является цифровой двойник. Основная функция цифрового двойника при выполнении ЯОР на стенде для критических сборок это

выполнить прогноз, как измениться скорость ионизирующего излучения (нейтронный поток) и температура при изменении геометрии системы на каждом этапе сборки РС, а КФС опираясь на приборы оперативного контроля (детекторы нейтронов, термопары и тд.) должен провести оценку соответствия полученных экспериментальных данных с рассчитанными. Тем самым и будет обеспечиваться оперативный контроль правильности выполнения технологических операций.

Такая технология проведения работ позволит исключить персонал стенда из выполнения операций непосредственно с делящимися материалами и оставить его только в роли контролирующего органа.

Заключение

Цифровизация экспериментов на стендах для критических сборок – безальтернативный путь повышения точности, надежности и безопасности безлюдного проведения ядерно опасных работ на ядерных исследовательских установках типа ФКБН.

Применение для сборки РС «обычных» робототехнических комплексов, не имеющих обратной связи с собираемой системой, не применяющих цифровых двойников, будет повышать неопределенность из-за отсутствия полноценного адекватного контроля, а напротив, сделает проведения подобных работ более опасным.

Эксплуатационные ограничения на критических стендах (количество делящего материала на рабочем месте, делящийся материала, величина излучения и т.д.) установленные на участках связаны с требованиями по ядерной и радиационной безопасности для персонала при работе с делящимися материалами. Исключение человека из ЯОР и замена его техническими средствами позволит открыть совершенно новый подход к самой постановке критмассовых измерений (первый критический стенд ФКБН создан в 1958 году), что откроет уникальные возможности для теоретиков и экспериментаторов по проведению экспериментов с конфигурациями и материалами РС, работа с которыми сейчас невозможна.

На текущий момент риски, связанные с человеческим фактором, регулируются многоступенчатым контролем, экспертизой, надзором и другими способами, субъектом которых также является человек. Конечно, имеются технические средства обеспечения безопасности людей, однако, зачастую их роль сводится к информированию людей о свершившемся ядерном инциденте. Именно поэтому необходимо если не исключить, то минимизировать вклад человека в ЯОР.

Исключение человека из ЯОР на стендах для критических сборок позволит:

1. Повысить безопасность проведения работ, за счет существенного снижения риска переоблучения персонала, как при аварийных ситуациях, так и при нормальной эксплуатации;
2. Повысить надежность, в первую очередь, за счет исключения «человеческого» фактора. Привыкание, желание ускорить или «оптимизировать» выполнение работ персоналом может привести к нарушениям или отклонениям от регламента выполнения работ, что может быть полностью исключено при применении роботизированных систем.
3. Повысить качество, точность и производительность. За счет использования систем машинного зрения на более высоком уровне (недостижимом в случае выполнения работы человеком) будет выполняться проверка качества используемых для сборки РС деталей (деформация, отслоение защитных покрытий и т.д.), повыситься точность определения геометрии собираемых систем, что существенно снижает погрешность для расчетных моделей. Поскольку системы машинного зрения имеют более высокую скорость обработки обступаемых данных, сократиться время для подготовки к ЯОР и исключит вероятность проведения повторных экспериментов в результате получения ошибочных экспериментальных данных в случае некачественной сборки РС.

Особенно важно отметить, что виртуальные и технические задачи по цифровизации ЯОР на критических стендах будут решаться на основе отечественного программного обеспечения и технической базы (манипуляторов, систем машинного зрения и т.д.), что позволит в дальнейшем не только поддерживать этот проект, но и развиваться дальше и стать драйвером для цифровизации российской промышленности.

Цифровизация ЯОР на критических стендах, не смотря на «узкость» задачи, может в дальнейшем использоваться не только для других ЯОР, но и на радиационно опасных, взрывоопасных и т.д. работах, где требуется в работах минимизировать участие человека и получить высокие показатели надежности, безопасности и точности.

Литература

1. Леваков Б.Г., Лукин А.В., Магда Э.П. и др. Импульсные ядерные реакторы РФЯЦ—ВНИИТФ. Снежинск, РФЯЦ-ВНИИТФ, 2002.

Информация об авторах

Андреев Сергей Александрович, к.ф.-м.н., начальник отдела, ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина», г. Снежинск Челябинской области, ул. Васильева, д. 13, а/я 245, dep5@vniitf.ru

Касьянов Сергей Юрьевич, инженер, ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина», г. Снежинск Челябинской области, ул. Васильева, д.13, а/я 245, dep5@vniitf.ru

Опыт применения РТК при отработке технологии демонтажа конструкций остановленного уран-графитового реактора

А.О. Павлюк[1,2]✉, Е.В. Беспала[1,2], С.Г. Котляревский[1], Е.С. Падерин[1], А.А. Шешин[1], Р.И. Кан[1], А.Э. Риф[2]

[1]АО «Опытно-демонстрационный центр вывода из эксплуатации уран-графитовых реакторов» (АО «ОДЦ УГР»), г. Северск, Томская область, Россия, pao@dnrc.ru
[2]Томский политехнический университет (ТПУ), г. Томск, Россия, pavlyuk17@tpu.ru

Аннотация
Представлен уникальный опыт, полученный на ОДЦ УГР (г. Северск) в рамках НИОКР по отработке технологий демонтажа графитовой кладки на остановленном в 2008 г. промышленном уран-графитовом реакторе АДЭ-5. Рассмотрены технические решения и подходы, опробованные с помощью робототехнического комплекса (РТК). Выполнен анализ проблем и возможностей демонтажа конструкций реактора с помощью РТК. Представлена основная информация об условиях эксплуатации РТК и результаты эксперимента по оценке радиационной стойкости элементов РТК.

Ключевые слова
Вывод из эксплуатации, уран-графитовый реактор, демонтаж, графитовая кладка, облученный графит, робототехнический комплекс.

Experience of using RTC to develop technology for dismantling structures of a shutdown uranium-graphite reactor

Alexander O. Pavlyuk[1,2]✉, Evgeniy V. Bespala[1,2], Sergei G. Kotlyarevsky[1], Egor S. Paderin[1], Alexander A. Sheshin[1], Roman I. Kan[1], Anastasia E. Rif[2]

[1]Pilot and Demonstration Center for Decommissioning of Uranium-Graphite Nuclear Reactors (PDC UGR), Seversk, Russia, pao@dnrc.ru
[2]National Research Tomsk Polytechnic University (TPU), Tomsk, Russia, pavlyuk17@tpu.ru

Abstract
The unique experience gained at the PDC UGR (Seversk city) is presented as part of R&D to develop technologies for dismantling graphite stack. The production uranium-graphite reactor ADE-5, which was shut down in 2008, was chosen as an object for testing technologies. Technical solutions and approaches tested using a robotic complex (RTC) are considered. An analysis of the problems and possibilities of dismantling reactor structures using RTC was carried out. Basic information on the operating conditions of the RTC and the results of an experiment to assess the radiation resistance of the RTC elements are presented.

Key words
Decommissioning, uranium-graphite reactor, dismantling, graphite stack, irradiated graphite, robotic complex.

Введение

На территории Российской Федерации к настоящему времени уже остановлены все 13 промышленных уран-графитовых реакторов (ПУГР), два блока с энергетическими реакторами АМБ-100 и АМБ-200 (Белоярская АЭС), реактор АМ (Калужская обл., г. Обнинск), один блок ЭГП-6 (Билибинская АЭС), четыре блока РБМК (два на Ленинградской АЭС и два на Курской АЭС). В эксплуатации еще находятся 7 энергоблоков РБМК и 3 энергоблока ЭГП-6, которые также планируется остановить в ближайшие ~10 лет [1]. Для энергетических уран-графитовых реакторов типа РБМК, АМБ и ЭГП-6 принята концепция вывода из эксплуатации (ВЭ) – «Ликвидация», заключающаяся в демонтаже всех конструкций реактора.

Необходимость применения РТК для демонтажа УГР обусловлена следующими причинами:

– часть конструкций и элементов реактора являются источниками интенсивного гамма и других типов излучений, что ограничивает возможности безопасного выполнения работ только персоналом;

– требуется достижение высокой производительности при выполнении демонтажных работ, включающие механические работы по резке, фрагментации и транспортировке крупногабаритных фрагментов оборудования.

К настоящему времени в РФ накоплен опыт полного демонтажа только исследовательского реактора РФТ и некоторых хранилищ РАО в Курчатовском институте, который показал эффективность применения РТК [2]. При этом необходимо отметить, что демонтаж промышленных и энергетических реакторов является более сложной задачей, что связано с более высокой активностью элементов конструкций и их значительными масса габаритными размерами [3,4,5]. При проектировании данных реакторов технические решения по

демонтажу не прорабатывались и соответственно их начали разрабатывать только в настоящее время после начала останова реакторов. Аналогичная ситуация имеет место также и за рубежом [5].

Современным трендом, принятым для решения подобных задач, является разработка и применение «безлюдных» технологий [1]. В связи с этим при финансовой поддержке Госкорпорации «Росатом» в АО «ОДЦ УГР» (г. Северск) совместно с АО «НИКИЭТ» (г. Москва) и ООО «СКТБ ПР» (г. Москва) был выполнен НИОКР по отработке технологий демонтажа графитовой кладки с применением РТК. В качестве объекта для отработки технологий для дальнейшего их тиражирования на энергетических реакторах был выбран остановленный ПУГР АДЭ-5, находившийся в эксплуатации ~40 лет. На момент начала работ период выдержки составил ~10 лет. Выбор данного реактора был обусловлен схожими конструктивными решениями, геометрическими и эксплуатационными параметрами реакторам типа РБМК. Работоспособные штатные коммуникации и оборудование позволили обеспечить безопасное выполнения работ без значительных дополнительных временных и финансовых затрат.

Варианты демонтажа графитовых кладок

Важное значение, влияющее на выбор типа РТК, имеет вариант демонтажа конструкций реактора, включая графитовую кладку. В настоящее время в РФ в основном рассматриваются три основных варианта демонтажа кладок УГР [4, 5]. Вариант № 1 заключается в обеспечении доступа сверху с полным демонтажом верхних металлоконструкций, являющихся биологической защитой (схемы «Е»). Вариант № 2 основан на организации доступа сверху через проем в схеме «Е». Вариант № 3 – предполагает организацию доступа к кладке сбоку с организацией проема в схеме «Д». Для реализации каждого из трех вариантов требуется применение РТК или манипулятора, отличающихся по типу и функционалу в зависимости от варианта. Учитывая высокие уровни излучения от конструкций, особенно характерные для реакторов мощностью более 100 МВт и конструкционные особенности реакторов в рамках НИОКР для отработки был выбран вариант №2, заключающийся в извлечении блоков графитовой кладки УГР через относительно узкий технологический проем [3, 4, 6, 7], специально сделанный в верхних металлоконструкциях (рис. 1).

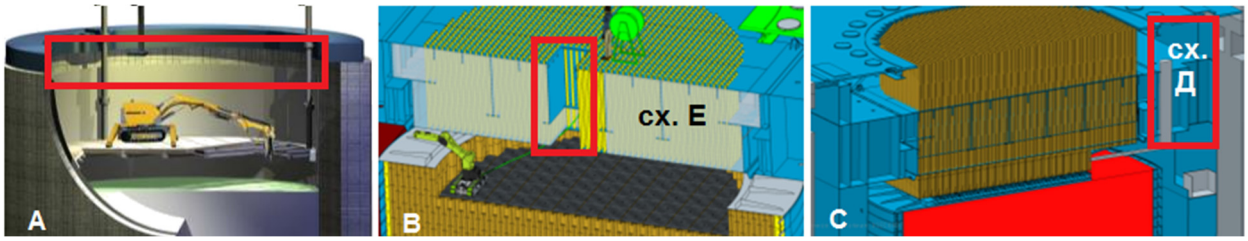


Рисунок 1 — Варианты демонтажа графитовых кладок: А – доступ сверху с полным демонтажем схемы «Е» (вариант № 1); В – доступ сверху с организацией проема в схеме «Е» (вариант № 2); С – доступ сбоку с организацией проема в схеме «Д» (вариант № 3). Красной рамкой показаны области демонтажа конструкций для доступа к кладке

К преимуществам варианта №2 относится:

- относительно небольшой объем предварительных работ (демонтаж схемы «Е» и коммуникаций только в районе проема);
- возможность работы персонала в непосредственной близости от проема;
- малая степень разгерметизации;
- близость проходки к месту извлечения блоков.

Поэтапный демонтаж путем удаления высокоактивных элементов при использовании защитных (поглощающие излучение) свойств других относительно «чистых» или менее загрязненных конструкций (верхняя биологическая защита, графитовые блоки и др.).

Основным недостатком варианта №2 является затрудненный доступ к графитовым блокам на начальном этапе демонтажа верхнего слоя графитовой кладки.

При этом выбор данного варианта предъявляет следующие требования к РТК:

- относительно небольшие габаритные размеры для работы в ограниченном объеме;
- радиационная стойкость к гамма-излучению;
- возможность использования и замены в процессе работы различного навесного оборудования для демонтажа конструкций разных типов;
- достаточная грузоподъемность для манипуляций (подъем, опускание и др.) элементами конструкций.

Условия эксплуатации РТК

В процессе реализации варианта №2 эксплуатация РТК осуществляется в относительно ограниченном объеме проходки внутри реакторного пространства (РП) в условиях интенсивного воздействия гамма-излучения, интенсивность которого меняться в зависимости от этапа выполнения работ [3]. Максимальная мощность эквивалентной дозы гамма-излучения может достигать уровней ~100 Зв/ч [3,4]. В металлоконструкциях (МК)

и вблизи с расположения активированных металлических элементов основным источником излучения является ^{60}Co. В графитовой кладке существенный вклад может давать продукт деления ^{137}Cs (рис.2). При этом энергетические спектры гамма-излучения в графитовой кладке являются рассеянными, а в МК более «жесткими» соответственно с меньшим вкладом рассеянного излучения. Температура конструкций внутри реактора идентична температуре окружающей среды. Освещение отсутствует. В процессе работ возможно пылеобразование и радиоактивное загрязнение конструкций РТК.

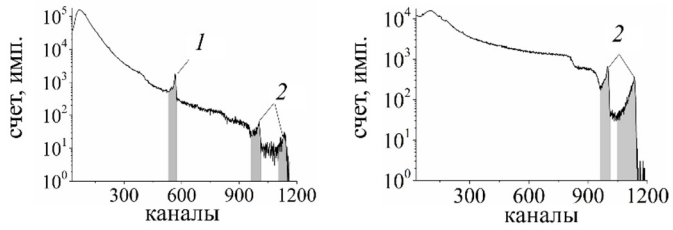


Рисунок 2 — Энергетические спектры гамма-излучения в графитовой кладке, полученные с помощью CdZnTe - детектора с коллиматором: 1 – ^{137}Cs ($E\gamma$ = 661,6 кэВ); 2 – ^{60}Co ($E\gamma$ = 1173 кэВ и 1332 кэВ)

Технические характеристики МРК -28

Для выполнения демонтажных работ по варианту № 2 необходимо выполнение следующих работ:

- захват, вертикальный подъем целых или обломков графитовых блоков;
- резка, высверливание, захват и вертикальный подъем металлических элементов конструкций;
- перенос и опускание металлических элементов и графитовых блоков или их фрагментов в емкость для их дальнейшего вертикального извлечения через проходку.

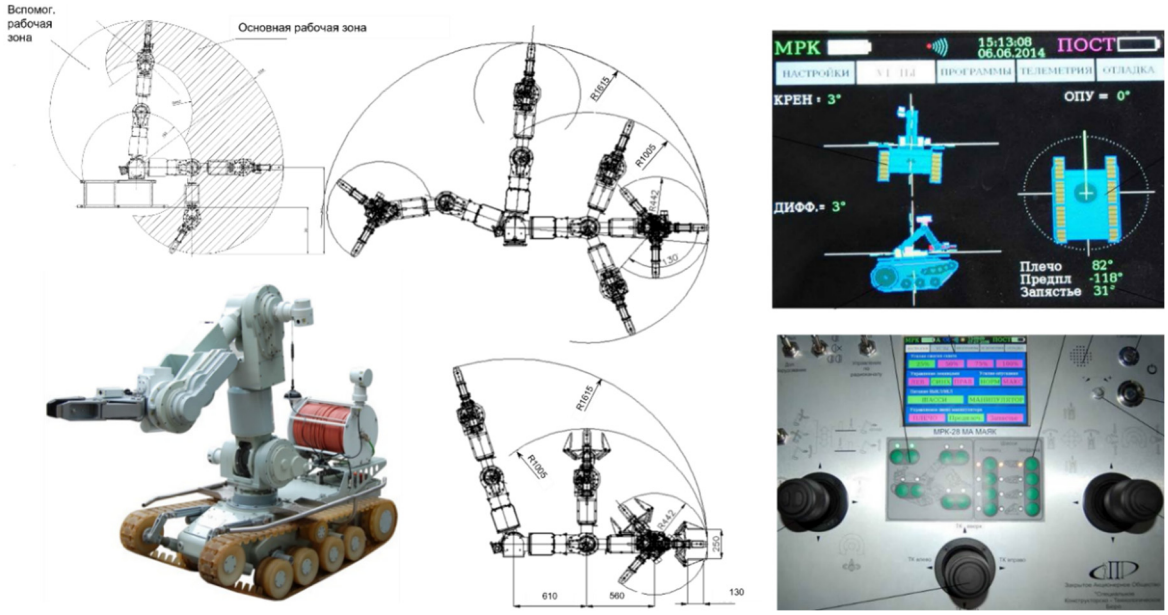


Рисунок 3 — Мобильный робототехнический комплекс МРК - 28 с зонами охвата манипулятора и пультом управления с возможностью регулирования нагрузки захвата и положения в пространстве

В ходе работы для определения основных базовых возможностей РТК с учетом необходимости эксплуатации в полях интенсивного гамма-излучения для выполнения демонтажных работ был опробован доработанный путем расширения функциональных возможностей отечественный робототехнический комплекс МРК-28 (ООО «СКТБ ПР»). В стандартной комплектации комплекс МРК-28 выполнен на гусеничном шасси, снабжен поворотным манипулятором, комплектом сменных хватов и инструментов. МРК-28 имеет собственную систему видеокамер, предназначенную для ориентации комплекса и активных его узлов в пространстве и наведения инструмента и хвата на объекты. Внешний вид и общие технические характеристики представлены на рисунке 3 в таблице 1.

Таблица 1 — Технические характеристики МРК -28

№ п/п	Наименование	Параметры
1	Масса комплекса, кг	150
2	Масса манипулятора, кг	70
3	Грузоподъемность номинальная, кг	50

№ п/п	Наименование	Параметры
4	Грузоподъемность максимальная, кг	100
5	Габаритные размеры, м	1,12x0,71x1,4
6	Кол-во степеней свободы	5
7	Макс. вылет стрелы, м	0,9
8	Общая длина звеньев, м	1,4
9	Движение губок схвата	плоскопараллельное
10	Раскрытие губок схвата, мм	0-250

Результаты предварительных испытаний

До начала опытных испытаний в условиях реакторного пространства был выполнен ряд тестовых испытаний, включающих:

– тестирование возможности работы электронных элементов робота в радиационных полях реакторного пространства;

– тестовые испытания различных типов захватов по подъему необлученных графитовых блоков;

– резка имитаторов элементов конструкций реактора с применением различного инструмента на макете, имитирующем верхний слой графитовой кладки ПУГР АДЭ-5 и металлоконструкций в пространстве между схемой «Е» и графитовой кладкой.

– транспортировка элементов конструкций и др.

Тестирование электронных элементов робота в реакторном пространстве

С целью определения влияния радиационного фактора на работоспособность мобильного РТК в реальных условиях (мощность эквивалентной дозы гамма-излучения не превышала 1,5÷5 Зв/ч, энергия гамма-квантов соответствовала ^{60}Co, температура воздуха в пределах 20-25 ^{0}C.) были выполнены испытания стенда, включающего в себя электронные элементы оборудования (видеокамеры разных типов, двигатели узлов манипулятора, блоки сервоприводов, платы и др.) в металлоконструкциях ПУГР (пространство между сх. «Е» и графитовой кладкой). Стенд находился в проходке в течение всего времени испытаний и ежедневно проверялся на работоспособность. Особый интерес представляла оценка возможности применения в реальных условиях недорогих и соответственно не предназначенных производителем для данных условий эксплуатации камер высокого и низкого разрешений. Через 2 недели испытаний проблемы возникли только с вращающейся цифровой камерой высокого разрешения. В ходе испытаний которой было отмечено замедление передачи сигнала с видеокамеры, появление помех на изображении в виде точек («снег») и полное прекращение работоспособности в условиях воздействия излучения через 2 недели нахождения в проходке, причем после извлечения из зоны облучения камера продолжала работать в штатном режиме. Все остальные элементы сохранили свою работоспособность на весь период испытаний.

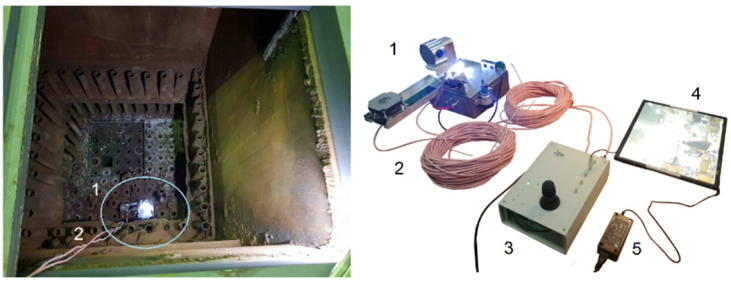


Рисунок 4 — Стенд в процессе проведения тестовых испытаний электронных элементов МРК в условия воздействия ионизирующего излучения в металлоконструкциях УГР: 1 – стенд с элементной базой; 2 – кабель; 3 – пульт управления элементной базой; 4 – планшет; 5 – блок питания планшета

Испытания стенда (рис. 4) с элементной базой (разработка ООО «СКТБ ПР», Москва) в верхних МК показали, что в целом основная элементная база МРК способна выдерживать дозовые нагрузки как минимум до 1,5 Зв/ч в течении 2 недель [3]. Таким образом, что касается видеокамер, то принципиально проблема периодического выхода их из строя может быть решена установкой дорогостоящих радиационно-стойких видеокамер или организацией периодической замены менее дорогих.

Тестовые испытания различных захватов для подъема графитовых блоков

Для определения наиболее оптимального типа захвата графитовых блоков были выполнены тестовые манипуляции с применением разных типов захватов от роботов Brokk 100, МРК-28 и его более ранней модификацией.

Необходимо отметить, что графит в сравнении с металлом является более хрупким материалом и подвержен разрушению на фрагменты при чрезмерном механическом воздействии, что необходимо учитывать при демонтаже графитовой кладки, состоящей из графитовых блоков. Существенную роль также играет способ

захвата, расположение блоков и их физико-механические характеристики и состояние (трещины и др.) после длительного периода эксплуатации в реакторе [4, 8].

С учетом этих факторов в ходе тестовых испытаний с применением необлученных графитовых блоков были опробованы три типа захвата, для отработки возможности захвата:

– за стенки внешней поверхности и внутреннего отверстия;
– за внешнюю поверхность графитового блока;
– за внутреннее отверстие.

Захват за стенки (внутреннюю и внешнюю), выполненный с помощью робота Brokk 100 (рис. 5), не обладавшего системой контроля нагрузки, привел к откалыванию фрагментов от блока. Наилучшие результаты были получены при захвате блока за внешние стенки, выполненный МРК-28 (рис. 5). При таком типе захвата риск фрагментации минимален, но необходимо учитывать, что расположение блоков в кладке не позволяет осуществлять данный тип захвата блоков на начальном этапе демонтажа, так как верхняя поверхность слоя расположения блоков относительно равномерная и только небольшая часть боковой поверхности (несколько сантиметров) некоторых блоков доступна для захвата. Из-за этого был опробован захват блока за внутреннее отверстие с помощью двух раздвигающихся полукруглых насадок, который также показал свою эффективность и возможность применения для неповрежденных блоков (без трещин) при условии контроля силы воздействия на внутреннюю стенку отверстия. По результатам испытаний были сформулированы рекомендации по совершенствованию конструкций стандартных захватов и разработки новых.

Рисунок 5 — Тестовые испытания различных захватов для подъема графитовых блоков с помощью Brokk (слева) и МРК-28 (справа)

Тестовые испытания различных захватов для демонтажа металлоконструкций

Для демонтажа металлоконструкций предварительно были выполнены тестовые испытания различного режущего инструмента на макете, имитирующего конструкции реактора (рис. 6). Результаты продемонстрировали возможности применения разных типов режущих насадок, которые после отбора были применены при испытаниях РТК в реальных условиях.

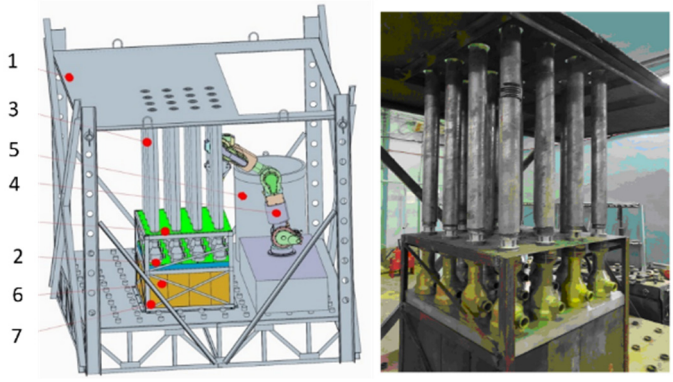


Рисунок 6 — Макет, имитирующий верхний слой графитовой кладки ПУГР АДЭ-5 и металлоконструкций в пространстве между схемой «Е» и графитовой кладкой: 1 – настил сх. «Е»; 2 – макет верхнего слоя кладки, кровли азотного коллектора, стаканов и плитного настила сборки 07; 3 – макет тракта технологического канала; 4 – манипулятор; 5 – емкость; 6 – графитовые блоки; 7 -решетка

Испытания на макете также позволили обучить персонал управлению РТК при его нахождении в относительно ограниченном пространстве.

Отработка технологий демонтажа в реакторном пространстве ПУГР

Для выполнения опытных работ на ПУГР АДЭ-5 РТК на специальной платформе был опущен в реакторное пространство через технологический проем, специально сформированный в верхних МК АДЭ-5 [7], и установлен на кровлю азотного коллектора реактора (рис. 7).

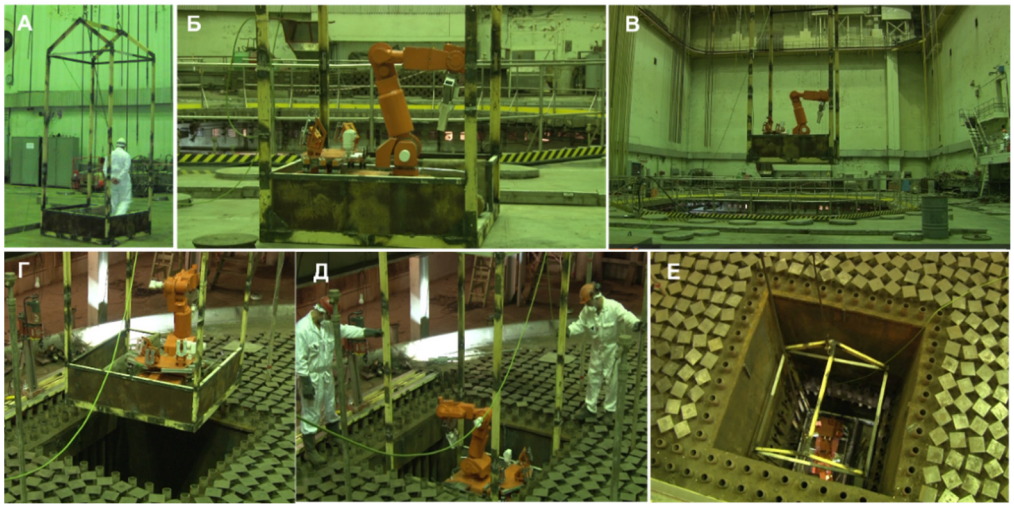


Рисунок 7 — Установка РТК через технологический проем в реакторное пространство ПУГР АДЭ-5: А – платформа; Б – РТК на платформе; В -транспортировка РТК на платформе; Г – наведение на проходку; Д – опускание платформы в проходке; Е – завершение процесса установки РТК в проходке на кровлю азотного коллектора

В процессе отработки операций в проходке управление РТК осуществлялось дистанционно с пульта управления, установленного в центральном зале реактора на безопасном расстоянии. В ходе испытаний (рис.8) в реальных условиях были испытаны работоспособность и управляемость комплекса, включая все его системы и различное навесное оборудование, которое находилось на РТК в специальной «кассете», и заменялось непосредственно внутри проходки. Были опробованы такие операции, как демонтаж и удаление переходных деталей технологических трактов в пространстве между схемой «Е» и кровлей, резка листовых алюминиевых конструкций (листов кровли).

Рисунок 8 — Выполнение операций по демонтажу элементов конструкций остановленного ПУГР АДЭ-5 с помощью РТК с применением различного навесного оборудования

Заключение

Результатом работы стала доработка РТК путем расширения его функциональных возможностей для дистанционного демонтажа элементов металлоконструкций и графитовой кладки реактора. Полученный опыт продемонстрировал возможность реализации варианта №2 демонтажа УГР. При этом РТК продемонстрировал возможность выполнения некоторых очень важных работ, которые крайне трудно реализовать с применением длинномерного инструмента.

Полученный опыт и разработанные рекомендаций являются базой для дальнейшего совершенствования РТК и технических подходов демонтажа УГР. В настоящее время наличие доступа к конструкциям реактора АДЭ-5 через сформированный технологический проем позволяет проводить испытания других типов оборудования в реальных условиях.

Литература

1. Вывод блоков из эксплуатации // Росэнергоатом. 2021. № 6.
2. Семенов С.Г. Разработка научно обоснованной методологии вывода из эксплуатации исследовательских ядерных реакторов и ее практическое применение: автореф. дис. доктора тех. наук. / С.Г. Семенов. – М., 2019. – 49 с. https://www.dissercat.com/content/razrabotka-nauchno-obosnovannoi-metodologii-vyvoda-iz-ekspluatatsii-issledovatelskikh-yadern/read.
3. Павлюк А. О., Котляревский С. Г., Кан Р. И., Загуменнов В. С., Падерин Е. С., Шешин А. А., Савран Е. А. Анализ радиационной обстановки при организации проема в верхних конструкциях остановленного уран-графитового реактора // Радиоактивные отходы 2022 № 1 (18) С 43—56 DOI: 10 25283/2587-9707-2022-1-43-56.
4. Павлюк А. О., Котляревский С. Г., Риф А. Э., Кан Р. И., Загуменнов В.С., Падерин Е. С., Шешин А.А., Зеленецкая Е.П. Обзор отечественного опыта и подходов извлечения графита из уран-графитовых реакторов // Радиоактивные отходы. 2023. № 4 (25). С. 35—54. DOI: 10.25283/2587-9707-2023-4-35-54.
5. Павлюк А. О., Котляревский С. Г., Беспала Е. В., Риф А. Э., Кан Р. И. Зарубежный опыт и подходы извлечения графита из уран-графитовых реакторов покрытием // Радиоактивные отходы. 2023. № 2 (23). С. 41—55. DOI: 10.25283/2587-9707-2023-2-41-55.
6. Падерин Е. С., Шешин А. А., Орлов К. Е. Подходы к демонтажу графитовых кладок при выводе из эксплуатации по варианту «ликвидация» // Радиоактивные отходы.2019. №3(8).С. 69—73. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-3-69-73.
7. Патент РФ № 2679827. Способ демонтажа графитовой кладки ядерного реактора. / Бирюков А.Н., Ермошин Ф.Е., Котляревский С.Г., Павлюк А.О., Падерин Е.С. и др. № 2018108943. заявл. 12.03.2018; опубл. 13.02.2019 Бюл. № 5.
8. Павлюк А.О., Котляревский С. Г., Кан Р. И., Волкова А. Г., Захарова Е. В., Комаров Е. А. Подходы к характеризации по гамма-излучающим радионуклидам графитовых блоков и их контейнеризации при демонтаже кладок УГР // Радиоактивные отходы 2021 № 3 (16) С 30—43 DOI: 10 25283/2587-9707-2021-3-30-43.

Информация об авторах

Павлюк Александр Олегович, к.ф.-м.н., директор НИЦ ВЭ ИЯТШ, Томский политехнический университет (ТПУ), Россия, 634050, г. Томск, Томская обл., пр. Ленина, д. 30, pavlyuk17@tpu.ru, ORCID: 0000-0001-8897-6910

Беспала Евгений Владимирович, к.ф.-м.н., заместитель директора по научно-техническому развитию, АО «Опытно-демонстрационный центр вывода из эксплуатации уран-графитовых реакторов» (АО «ОДЦ УГР»), Россия, 636000, г. Северск, Томская обл., Автодорога, д. 13, bevl@dnrc.ru, ORCID: 0000-0002-8488-3853

Котляревский Сергей Геннадьевич, ведущий инженер, АО «ОДЦ УГР», Россия, 636000, г. Северск, Томская обл., Автодорога, д. 13, ksg@dnrc.ru, ORCID: 0000-0001-8700-5100

Кан Роман Игоревич, ведущий инженер, АО «ОДЦ УГР», Россия, 636000, г. Северск, Томская обл., Автодорога, д. 13, kri@dnrc.ru, ORCID: 0000-0001-7121-5031

Падерин Егор Станиславович, инженер, АО «ОДЦ УГР», Россия, 636000, г. Северск, Томская обл., Автодорога, д. 13, esp@dnrc.ru

Шешин Александр Аркадьевич, начальник службы вывода из эксплуатации комплексов с ядерными установками, АО «ОДЦ УГР», Россия, 636000, г. Северск, Томская обл., Автодорога, д. 13, shaa@dnrc.ru

Риф Анастасия Эдуардовна, инженер НИЦ ВЭ, аспирант, ТПУ, Россия, 634050, г. Томск, Томская обл., пр. Ленина, д. 30, aer12@tpu.ru, ORCID: 0009-0004-8520-8237

Искусственный разум робота: функциональность и средства реализации

Л.А. Станкевич, А.М. Корсаков✉
Государственный научный центр Российской Федерации «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики» (ГНЦ РФ ЦНИИ РТК), Санкт-Петербург, Россия, anton_korsakov@mail.ru

Аннотация
Рассматривается проблема создания разумных роботов, которые имеют сознание и могут мыслить, как люди. Предполагается, что такие роботы должны обладать искусственным разумом, носителем которого является искусственный мозг. В системе искусственного разума должны быть реализованы не только традиционные интеллектуальные, но также когнитивные и креативные функции. Показано, что реализация таких функций возможна на базе многоагентной технологии с использованием продукционных, нейросетевых, нейроморфных и гибридных средств с глубоким обучением. Приведен пример реализации на глубокой рекуррентной сети когнитивной функции прогнозирования и планирования поведения мобильного робота в социальной среде с множеством динамических препятствий. Рассмотрена предлагаемая система искусственного разума, функционально подобная нервной системе человека, включающей мозг, а также сенсорную и моторную терминальные подсистемы. Возможна реализация такой системы с поэтапным усложнением набора когнитивных и креативных функций, моделирование которых предполагает участие нейрофизиологов и психологов. Предполагается также, что возможно автоматическое усложнение когнитивных функций за счет встроенных процедур саморазвития, основанных на эволюционных алгоритмах.

Ключевые слова
Искусственный разум, сознание, гуманоидный робот, когнитивные функции, креативность, реализация.

Благодарности
Результаты получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России № 075-00697-24-00 от 27.12.2023 «Исследование и разработка биоподобной системы управления поведением мобильных роботов на базе энергоэффективных программно-аппаратных нейроморфных средств».

Artificial mind of a robot: functionality and means of implementation

Lev A. Stankevich, Anton M. Korsakov✉
Russian state scientific center for robotics and technical cybernetics (RTC), St. Petersburg, Russia, anton_korsakov@mail.ru

Abstract
The problem of creating intelligent robots that have consciousness and can think like people is considered. It is assumed that such robots should have artificial mind, the carrier of which is an artificial brain. In the artificial mind system, not only traditional intellectual functions but also cognitive and creative ones should be implemented. It is shown that the implementation of such functions is possible on the basis of multi-agent technology using production, neural network, neuromorphic and hybrid tools with deep learning. An example of the implementation on a deep recurrent network of the cognitive function of forecasting and planning the behavior of a mobile robot in a social environment with many dynamic obstacles is given. The proposed artificial mind system is considered, functionally similar to the human nervous system, including the brain, as well as sensory and motor terminal subsystems. It is possible to implement such a system with a gradual complication of the set of cognitive and creative functions, the modeling of which involves the participation of neurophysiologists and psychologists. It is also assumed that it is possible to automatically complicate cognitive functions due to built-in self-development procedures based on evolutionary algorithms.

Key words
Artificial mind, consciousness, humanoid robot, cognitive functions, creativity, implementation.

Acknowledgements
The results were obtained as part of the implementation of the state assignment of the Ministry of Education and Science of Russia No. 075-00697-24-00 dated 12/27/2023 «Research and development of a biosimilar system for controlling the behavior of mobile robots based on energy-efficient software and hardware neuromorphic tools».

Введение

Цель работы – показать возможность создания разумных роботов, которые должны быть способны к сознательной деятельности, основанной на накопленных знаниях об объективной реальности и моделировании когнитивных и креативных функций. Предпосылки к обсуждению проблемы создания разумных роботов основаны на развитии интеллектуальных роботов, когнитивной робототехники, гуманоидных роботов и новых интеллектуальных средств. Интеллектуальные роботы, использующие символистские и коннективистские средства для работы со знаниями, уже достигли способностей, достаточных, чтобы заменить человека на простых работах. Развивающаяся когнитивная робототехника направлена на обеспечение дополнительных когнитивных способностей, усложняющих поведение робота и позволяющих ему рационально действовать в условиях, непредусмотренных его создателями. Возможно саморазвитие когнитивных способностей роботов в процессе познания окружающего мира, что обеспечивает повышение уровня разумности. Гуманоидные роботы создаются на базе антропоморфных роботов за счет повышения уровня разумности и усложнения поведения для обеспечения работы совместно с людьми. Новые интеллектуальные средства включают: глубокие нейронные сети, нейрологические сети, нейроморфные сети.

Понятие искусственного мозга было использовано в ряде работ, например, в работе [1], где описан проект искусственного мозга COGMOS. Понятие искусственного разума было введено в работе [2], где предлагалось рассматривать искусственный разум как техническую имитацию (воспроизведение) разумного поведения человека. Такая имитация наиболее перспективна для будущей гуманоидной робототехники [3]. Наряду с искусственным разумом, было введено понятие искусственной психики [4], которая, по мнению автора, является единой системой, объединяющей освоенные машинами когнитивные навыки. Предполагается, что искусственная психика, как архитектура, может быть новой операционной системой роботов, способной обучаться множеству профессий, подобно тому, как это делают люди. В определенной степени, это соответствует концепции искусственного разума.

Мозг и коннектом

Можно рассматривать мозг как гиперсеть (сеть сетей) с базовыми элементами – нейронами разного типа. Эта гиперсеть включает ряд связанных отделов (кора мозга с разными функциями, мозжечок, гиппокамп, гипоталамус и пр.), которые составлены из нейронных пулов, объединяющих нейроны разного типа. Структура мозга очень сложна, но ее описание является приоритетной задачей исследователей. Для описания этой структуры используется обобщающий термин «коннектом» [5]. В настоящее время под коннектомом понимают полное описание связей в нервной системе любого организма. Существует мнение, что понимание того, как работает психика, может быть достигнуто, если будет создана полная карта всех связей нейронов.

Однако работа по описанию коннектома наталкивается на серьезные трудности. Так, на описание коннектома нервной системы микроскопического круглого червя с 302 нейронами и 7000 связей у южноафриканских биологов ушло 12 лет упорного труда. Сегодня уже сделаны частичные коннектомы сетчатки и зрительной коры мозга мыши. Огромный массив данных (12 терабайт) выложен в открытый доступ в рамках проекта Open Connectome. Но для раскрытия коннектома мозга человека, включающего 140 миллиардов нейронов, требуются более совершенные технологии и огромные ресурсы. Созданием такого атласа нейронов и связей человеческого мозга занят проект Human Connectome Project. В 2013 году был запущен еще один глобальный проект BRAIN, в котором коннектом человека признан одним из приоритетов.

Разум, сознание и когнитом

Разум является результатом работы мозга. Основой его является мышление и сознание. Проблема сознания – ключевая для разума. Эта трудная проблема недавно стала серьезно изучаться. На последней конференции «Сознание-2024» (МГУ) о сознании говорили многие известные ученые. Проведенная в 2017 году конференция российских ученых и буддийских монахов показала, что даже определение понятия «сознание» четко не определено [6]. Однако уже сформировались некоторые определения сознания, как: субъективной реальности, т. е. мыслей, идей и всего, что ощущает человек (К.В. Анохин); способности системы генерировать, сохранять и распространять свою субъективную информацию (О.Д. Чернавская); сиюминутного субъективного переживания первого лица, «взгляд изнутри» субъекта (А.В. Самсонович).

Разум связан с человеческой психикой и изучается психологами и нейрофизиологами. Теорию разума, вероятно, построить невозможно, поскольку эта область пока нами не понята и, вероятно, не будет до конца понята никогда. Используя накопленные знания, можно определить разум, как виртуальную гиперсетевую реализацию когнитивных и креативных процессов в структуре мозга. Структура гиперсетей разума принципиально изменчива, поскольку все время меняются решаемые задачи. Когнитивные и креативные функции разума формируются при обучении человека, продолжающегося всю его жизнь, и фиксируются в распределенной памяти мозга. Разум находит и активизирует нужные функции в ответ на текущую цель и ситуацию и глушит другие ненужные активные функции.

В соответствии с теорией нейронных гиперсетей К.В. Анохина, мышление и сознание порождается синхронной работой распределенных нейронных ансамблей. Нейроны каждого ансамбля могут быть расположены в разных участках мозга, и они объединяются на короткое время, чтобы решить определенную когнитивную задачу. Совокупность элементарной нейронной сети и соответствующего ей единичного когнитивного опыта он назвал когом. Ког объединяет в себе нейронный носитель сознания и собственно элемент сознания, единицу когнитивного опыта. Полный набор когов в субъективном сознании, сформированный в процессе познания субъекта назван когнитом. По своей сути когнитом – гиперсеть, в которой каждой совокупности определенным образом связанных элементов нейронного ансамбля нижнего уровня соответствует элемент верхнего уровня (ког). Нейронные ансамбли нижнего уровня могут перекрываться, и за счет этого формируются ассоциативные связи между когами, образуя мысленные цепочки в мозгу. Все коги связываются в единую структуру, поэтому при активации одного кога, могут активироваться все те коги, в которых есть общие с первым когом элементы. Когнитом – постоянно растущая и изменяющаяся структура. Человек рождается с рудиментарным когнитомом, содержащим очень небольшой набор функциональных систем. Но с первых же минут жизни он начинает обрастать сетью новых, отличающихся у каждого из нас когнитивных элементов. Когнитом с возрастом стареет, коги распадаются и теряются их связи.

Из приведенных описаний коннектома и когнитома следует, что мозг материален и является носителем разума. Используя эти положения можно говорить о возможном моделировании мозга и разума, т. е. об искусственном мозге и искусственном разуме.

Искусственный мозг

Искусственный мозг – техническая реконструкция мозга человека, которую пытаются создать специалисты по искусственному интеллекту и робототехнике в содружестве с нейрофизиологами. В идеале он должен быть действующей моделью мозга человека. Однако искусственные нейроны, построенные на формальных моделях, из-за своей простоты не копируют работу нейронов мозга. Для решения задач нейроны объединяются в сетевые ассоциативные структуры, не очень похожие на нейронные ансамбли мозга. Биологический нейрон – минимальная живая клетка, которая не просто собирает входные сигналы и передает дальше результат, а борется за свою жизнь в содружестве с другими нейронами по принципу – кто не работает, тот не ест. Биологический нейрон очень сложен для моделирования. Наиболее правдоподобные модели таких нейронов, созданные нейрофизиологами и математиками, включают более 500 дифференциальных уравнений. На практике используются менее правдоподобные модели биологических нейронов, реализованные программно или даже аппаратно, и на их основе строятся, так называемые, нейроморфные сетевые вычислители. При этом имеет место существенные вычислительные трудности, поэтому пока нейроморфные сети используются в основном в исследовательских проектах. Однако многие исследователи считают, что со временем они могут стать эффективным средством для создания действующей модели мозга.

В настоящее время, вероятно, более приемлемо не моделировать мозг на базе биоподобных моделей нейронов, а рационально использовать современные сетевые вычислители, построенные на искусственных нейронных сетях с глубоким обучением, которые уже достигли огромных мощностей и позволяют решать многие интеллектуальные задачи иногда даже лучше, чем человек. Исходя из возможностей таких нейросетевых вычислителей, искусственный мозг может рассматриваться как гиперсеть, которая реализована на множестве связанных компьютерных вычислителей (кластеров и серверов), составленных в свою очередь из гетерогенных многоядерных процессоров.

Искусственный разум и сознание

Искусственный разум основан на технической имитации разумного поведения человека, т. е. процессов мышления и сознания. При создании искусственного разума очень важно определить, что такое мышление и сознание и можно ли их моделировать. С технической точки зрения, сознание можно определить, как результат мышления в плане осознания того, что воспринимается разумом. При этом мышление можно определить, как процесс целенаправленной обработки информации при решении различных задач. Если возможно моделировать мышление, то, вероятно, можно моделировать и сознание.

Исходя из приведенного здесь описания естественного разума и возможных средств его моделирования, искусственный разум может быть реализован как гиперсеть когнитивных структур, которые состоят из виртуальных когнитивных агентов, представляющих локальные когнитивные системы. Для этого, вероятно, можно использовать сетевые вычислительные средства, способные решать когнитивные задачи ассоциативным способом, т. е. непосредственно в памяти. Используя подходящие вычислительные средства для решения когнитивных задач, можно моделировать, как мышление, так и сознание.

Обсуждение проблемы моделирования мышления и сознания началось после появления общедоступных больших лингвистических моделей (БЛМ) типа ChatGPT-3. До этого многие считали, что БЛМ, реализованные на глубоких нейронных сетях типа трансформеров, вообще не модели мышления, а инструменты для обработки и генерации текстов. Однако после появления ChatGPT-3 с 175 миллиардами параметров количество перешло в качество, и эта модель стала способна на почти человеческие коммуникации. Но при этом она

может и соврать или вести себя как непослушный ребенок. Некоторые специалисты считают, что поскольку в этой модели отсутствует мозг, нет гомеостаза и эмоций, она не может иметь сознания, а значит и разума. Но БЛМ все время развиваются, сейчас вышла ChatGPT-4, и кто знает, чего могут достичь умные нейросети в ближайшем будущем.

В принципе, создание искусственного разума в первом приближении возможно с использованием материального носителя – искусственного мозга, построенного на современных программных или аппаратных вычислительных средствах, имеющих гиперсетевую топологию. Однако развитие искусственного разума в плане максимального приближения его возможностей к таковым в разуме человека может быть проблематично, поскольку в исследованиях мозга и разума еще много нерешенных проблем. Наряду с тем, что понятие «сознание» во многом не определено, имеет место понятие субъективного «Я», объединяющее мозг и тело конкретного человека, которое, как говорят, не может быть моделировано в искусственных системах. Однако, если вспомнить о гуманоидных роботах, для которых нужен искусственный разум, то у них есть тело, которое имеет свои особенности у каждого из них. И развивающийся искусственный разум гуманоидного робота может обеспечить ему собственное «Я», отличающее его от других роботов.

Функциональность и средства реализации

В соответствии с гипотетической теорией Л.А. Станкевича [3], в искусственном разуме можно выделить интеллектные, когнитивные и креативные процессы, которые формируются при обучении системы последовательному формированию целей их реализации, причем само целеполагание является верхнеуровневым процессом искусственного разума. Под интеллектными процессами понимаются процессы с логическим выводом на знаниях или процессы в искусственных нейронных сетях с ассоциативным выводом. Когнитивные (познавательные и мыслительные) процессы реализуются в обучаемой ассоциативной памяти с ассоциативным выводом. Креативные процессы можно выделить из когнитивных по признаку создания чего-то нового (имитация творчества), что, вероятно, необходимо для развитых систем искусственного разума.

Концепции искусственного разума могут быть определены только грубо в пределах нашего понимания разума человека. В первом приближении можно сформировать следующие общие концепции: вложенная функциональность – можно выделить простые функции, параллельные композиции функций (отношения) и последовательно-параллельные цепи функциональных структур (процессы); многоагентность – искусственный разум может строиться как сеть взаимодействующих виртуальных агентов, каждый из которых реализует свои процессы; виртуальность – процессы и реализующие их агенты образуются в структуре искусственного разума виртуально, используя имеющиеся средства искусственного мозга.

Основа искусственного разума – когнитивные модели, которые используются для реализации процессов мышления и сознания. Компонентами этих процессов являются когнитивные функции. Можно выделить когнитивные процессы восприятия информации, поиска в памяти по запросам, формирования поведений разного типа (при общении, навигации, индивидуальном и коллективном решении задач и пр.), обучения и самоорганизации. Обучение имеет целью адаптацию когнитивных моделей к решению задач при изменениях окружения путем их оптимизации, т. е. структурной и параметрической настройки по определенным критериям. Самоорганизация необходима для настройки искусственного разума на решение задач, определяемых новыми целями. В результате самоорганизации когнитивные модели перестраиваются путем функционального конструирования сетевой структуры искусственного разума. При этом топология носителя разума, искусственного мозга, может оставаться неизменной.

Для реализации когнитивных функций могут быть использованы продукционные, нейронные, нейроморфные и гибридные сети с глубоким обучением.

В качестве примера рассмотрим реализации когнитивной функции планирования действий мобильного робота с прогнозированием в социальной среде. Пространство действий робота включает скорость и угол направления движения, $\boldsymbol{at} = [vt, \varphi t]$. При этом пространство представляется дискретным и включает 11 значений: пять значений φ из диапазона $[-\pi/6, \pi/6]$ с равным шагом при $v = vpref$, три значения φ из диапазона $[-\pi/6, \pi/6]$ с равным шагом при $v = vpref/2$ и $v = 0$, где $vpref$ – предпочтительная скорость агента в м/с. Среда включает n агентов. В момент времени t состояние среды описывается следующим вектором

$$\boldsymbol{s}_t = \left[\boldsymbol{s}_t^a,\ \tilde{\boldsymbol{S}}_t^o\right],$$

$$\tilde{\boldsymbol{S}}_t^o = \left\{\tilde{\boldsymbol{s}}_{i,t}^o : i \in \{1,\ 2,\ \ldots,\ n-1\}\right\},$$

где $\boldsymbol{s}_t\ a \in \mathbb{R}^4$ – состояние агента; $\tilde{\boldsymbol{s}}_{i,t}^o \in \mathbb{R}^7$ – наблюдаемое состояние соседнего агента.

Векторы состояний включают следующие значения

$$\boldsymbol{s}^a = \left[d_g,\ v_{pref},\ \varphi,\ r\right],$$

$$d_g = \left\|\boldsymbol{p}_g - \boldsymbol{p}\right\|_2,$$

$$\tilde{\boldsymbol{s}}^o = [\tilde{p}_x,\ \tilde{p}_y,\ \tilde{v}_x,\ \tilde{v}_y,\ \tilde{r},\ \tilde{d}_a,\ \tilde{r}+r],$$

$$\tilde{d}_a = \|\boldsymbol{p} - \tilde{\boldsymbol{p}}\|_2,$$

где r – радиус окружности, описывающей агента в метрах; $\tilde{r}$ – радиус окружности, описывающей соседнего агента в метрах; $\boldsymbol{p}_g = [p_{gx},\ p_{gy}]$ – координаты целевой позиции в метрах; $\boldsymbol{p} = [p_x,\ p_y]$ – координаты агента в метрах; $\tilde{\boldsymbol{p}} = [\tilde{p}_x,\ \tilde{p}_y]$ – координаты соседнего агента в метрах; $\tilde{v}_x,\ \tilde{v}_y$ – скорость соседнего агента в м/с.

Используется обучение с подкреплением, причем функция вознаграждения описывается выражением

$$r_t = \begin{cases} 1, \text{ если } \boldsymbol{p} = \boldsymbol{p}_g \\ -0{,}1 - 0{,}5d_{min}, \text{ если } 0 < d_{min} < 0{,}2 \\ -0{,}25, \text{ если } d_{min} < 0 \\ 0, \text{ иначе} \end{cases},$$

где d_{min} – расстояние до ближайшего агента в метрах .

Для реализации когнитивной функции планирования используется одна рекуррентная сеть LSTM (Long Short-Term Memory) для аппроксимации одновременно функции ценности и политики (рис. 1).

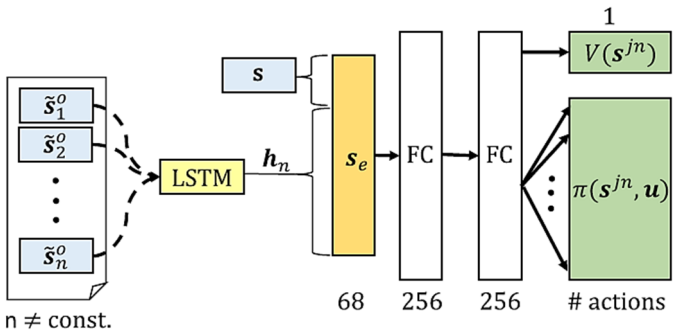


Рисунок 1 — Общая структура алгоритма планирования

Для обучения используется метод типа «актер-критик, предполагающий параллельные взаимодействия агентов со средой для накопления общего обучающего набора данных. Обучение происходит в два этапа. Первый этап предполагает обучение с учителем на наборе данных, созданном с помощью алгоритма CADRL (Collision Avoidance with Deep Reinforcement Learning). На втором этапе используется двумерная среда моделирования. Сценарий планирования движения предполагает переменное число агентов (от двух до десяти) и вариативность политики. В дополнение к агентам, управляемым текущей политикой, добавляются статичные агенты и некооперативные агенты, не учитывающие взаимное влияние.

На рисунке 2 показаны 4 последовательных эпизода прохождения роботом от начальной позиции до целевой с уклонением от столкновения с движущимися объектами. Робот успешно лавирует между движущимися препятствиями, определяя текущую ситуацию и прогнозируя их поведение.

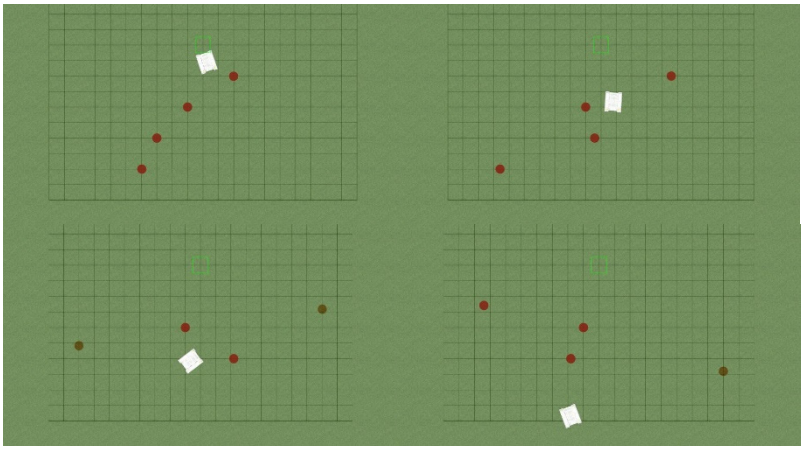


Рисунок 2 — Пример обхода роботом препятствий

Креативные модели реализуют творческие процессы. В определенной степени их можно считать когнитивными моделями, ориентированными на генерацию чего-то нового, что не было заложено при проектировании системы или это новое возникло при обработке поступающих данных.

В рамках искусственного разума представляет интерес обсуждение возможностей моделирования вербального (логического) и образного мышления в форме соответственно логического, ассоциативного, ментального и креативного вывода при решении разнообразных задач. Логический вывод хорошо развит и основан на классических методах представления логических и объектных знаний, выводах в исчислении предикатов или продукций, а также выводах в семантических и фреймовых сетях. Такие формы вывода можно использовать для моделирования логического мышления левого полушария головного мозга человека. Ассоциативный вывод используется в системах, имеющих форму сетей (логических, нейронных или гибридных). Такой вывод более соответствует работе нейронных структур головного мозга и в принципе может использоваться для моделирования работы, как левого, так и правого полушарий. Ментальный вывод используется в искусственных когнитивных системах. Его основу составляют психологические теории познания, сознания и практического вывода. Такой вывод может использоваться для моделирования высокоуровневых функций мышления, связанных с кратковременной и долговременной памятью, восприятием информации, прогнозированием, планированием, формированием поведения, взаимодействием с окружением, накоплением знаний в процессе функционирования. Креативный вывод можно считать основой искусственного разума. Разработка методов креативного вывода находится на начальном этапе. Здесь требуется разработать средства памяти образов и абстракций, а также методы формирования оригинальных решений, реализации предвидения, воображения, озарения (интуиции). Креативный вывод, вероятно, лежит в основе эволюции поведения. Поэтому понимание возможностей его реализации может быть достигнуто путем моделирования эволюционирующих систем.

Искусственный мозг может быть реализован, например, на базе суперкомпьютера кластерного типа с аппаратно соединенными гетерогенными вычислительными узлами. Другой вариант реализации – нейроморфные вычислители с иерархической сетевой структурой – может быть использован, когда такие вычислители смогут стать конкурентно способными по сравнению хорошо развитыми вычислителями традиционной архитектуры.

Искусственный разум может быть реализован в искусственном мозге программно с использованием виртуализации, на базе специализированной операционной системы. При этом искусственный разум может иметь архитектуру многоагентной системы с виртуальными когнитивными агентами, которые обрабатывают информацию и формируют целенаправленные поведения.

Организация процессов вычислений и поиска информации в искусственном мозге и искусственном разуме может быть реализована по типу Интернета. В принципе, сам Интернет может рассматриваться как некоторый уже существующий и постоянно развивающийся вариант искусственного мозга и разума. Эту идею подтверждают и в нейронауке, предполагая, что наш мозг на нейронном уровне работает подобно Всемирной паутине — распределённой системе веб-документов, объединённых гипертекстовыми связями между собой.

Система искусственного разума робота

Гипотетически можно определить функции, структуру и компоненты системы искусственного разума робота следующим образом [3]. В этой системе могут быть реализованы три набора функций: (1) *интеллектные*, обеспечивающие память фактов и знаний и логический вывод или ассоциативную память, ассоциативный вывод и обучение; (2) *когнитивные*, связанные с кратковременной и долговременной памятью; накоплением знаний; ментальным выводом; восприятием информации; прогнозированием; планированием, селекцией поведения; взаимодействием; (3) *креативные*, отвечающие за построение абстрактных моделей; построение обобщающих гипотез; формирование оригинальных решений; предвидение (воображение); озарение (интуиция); эволюцию поведения (рис. 3).

При этом имеют место *три информационных канала*, реализующие перечисленные функции, в каждом из которых обрабатывается информация, накапливаемая в *вербальной и образной моделях мира* (окружающей среды). В свою очередь эти модели интегрируют исходную информацию от *сенсорных функций*. Результаты обработки информации в каждом канале обрабатываются *моторными функциями*, которые обеспечивают координированное управление актуаторами робота при реализации выбранных действий. Имеет место также *прямой сенсомоторный канал*, который обрабатывает исходную информацию только сенсорными функциями, и результаты этой обработки сразу используются модулями моторных функций. Так может быть реализовано наиболее быстрое (рефлекторное) координированное управление актуаторами робота.

Вербальная модель мира может быть реализована средствами вербально-логической памяти, в то время как образная модель мира – средствами ассоциативной памяти и вывода. *Сенсорные и моторные функции* наиболее эффективно могут быть реализованы нейроморфными средствами с параллельной ассоциативной обработкой информации. Интеллектные функции традиционно реализуются с использованием логических средств обработки вербальной информации и принятия решений. Для реализации когнитивных и креативных функций, вероятно, лучше использовать нейрологические средства обработки вербально-образной или чисто образной информации.

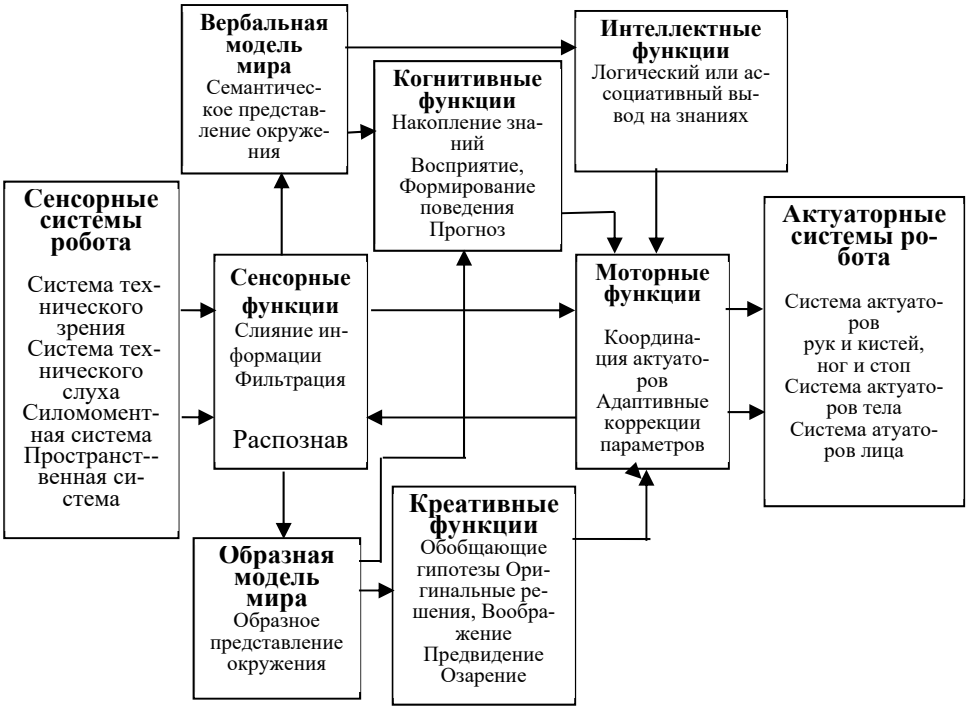


Рисунок 3 — Функциональность и средства реализации искусственного разума

Искусственный мозг, как носитель искусственного разума робота, по аналогии с мозгом человека, можно построить как иерархическую структуру, состоящую из *центральных сетей* сложной топологии, которые реализуют функции, присущие правому и левому полушарию мозга, и связанных с ними пирамидальных восходящих и нисходящих многослойных нейронных сетей (рисунок 4).

Главные компоненты центральных нейронных сетей – *виртуальные агенты*, которые формируют необходимые поведения, используя *символьное и образное поля*, где образуются вербальная и образная модели мира путем накопления и обработки информации об окружении и реализуются интеллектные, когнитивные и креативные функции, а также функции взаимодействия агентов. Результаты работы агентов накапливаются в *поле поведений*,

Символьное и образное поля являются основными компонентами представления и использования соответствующих моделей мира. Взаимодействие между этими полями приводит к необходимым преобразованиям образов объектов в абстрактные представления и обратно. В символьном поле модель мира представлена в форме символьных фактов и отношений, а также объектов и связей. Эти представления используются для реализации интеллектных функций с логическим выводом, а также когнитивных функций с использованием символьных представлений, ассоциативной памяти и вывода. В образном поле модель мира представлена как память образов, в среде которых выполняются когнитивные и креативные функции с использованием образных представлений, а также эволюционные преобразования самого поля.

Виртуальные агенты реализуют функции выбора поведений. Агенты имеют на входах символьные или образные представления текущей ситуации, которые далее подвергаются преобразованиям с целью декомпозиции их на подситуации и принятия решений по выбору соответствующих простых компонентных поведений из поля поведений с прогнозированием возможных результатов исполнения этих поведений. Из выбранных компонентных поведений формируются простые цепочки последовательных поведений в данной ситуации или сценарии в более сложных случаях. Заметим, что информацию о текущей ситуации получают все агенты, но только один из них выбирается в результате взаимодействия по определенным правилам и получает право формировать поведение в текущей ситуации. Активность других агентов блокируется.

Восприятие информации и координация исполнения поведений реализуются локальными нейронными сетями, образующими восходящую и нисходящую ветви системы. *Восходящая ветвь* отвечает за восприятие сенсорной информации и реализует сенсорные функции, которые комплексируют и обрабатывают сенсорную информацию от *терминального сенсорного поля*. В этой ветви послойно реализуется восходящая композиция, формирующая в итоге распознанные образы, из которых формируются сложные объекты и сцены. Эти образные представления используются в центральных сетях для наполнения символьной и образной моделей мира и их коррекции. *Нисходящая ветвь* отвечает за координацию исполнения выбранных поведений и реализует моторные функции отработки выработанных поведений. Эта ветвь имеет на входе образы действий, которые инициируют декомпозиционный процесс формирования компонентных действий *терминального актуаторного поля* робота. Дополнительно реализуются *прямые сенсомоторные связи* между разными уровнями

восходящей и нисходящей ветвей. Эти связи обеспечивают непосредственное преобразование сенсорной информации разного уровня в действия без участия центральных сетей, организуя простые врожденные или обучаемые поведения системы по типу «стимул-реакция».

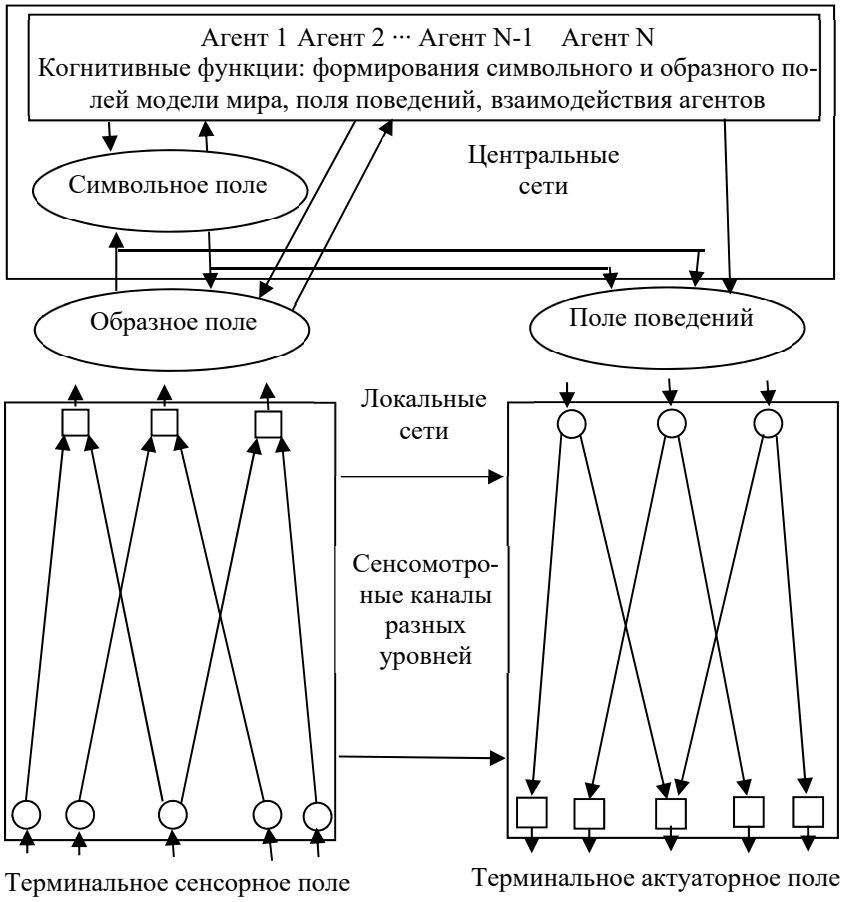


Рисунок 4 — Структурная организация искусственного мозга

Предполагается, что топология полей и ветвей сетей системы искусственного мозга должна быть определена заранее при проектировании.

Минимальными структурными элементами всех полей и ветвей являются клетки, имеющие собственную ассоциативную память. Клетки вкладываются в более сложные компоненты: модули, реализующие простые преобразования образов, и локальные сети, осуществляющие сложные композиционные и декомпозиционные преобразования образов. Клетки могут быть реализованы как формальные или биоподобные нейроны, а также как гибридные нейрологические модули.

Локальные сети ветвей восприятия и исполнения действий должны иметь фиксированную пирамидальную структуру, определенную при проектировании. Центральные сети могут быть взаимодействующими распределенными сетями произвольной топологии, составленные из клеток, модулей и локальных сетей. Эти сети должны быть способны эволюционировать в зависимости от возникающих или же отмирающих целей.

Заключение

Искусственный разум, носителем которого является искусственный мозг, неизбежно будет создан содружеством ученых, специалистов по искусственному интеллекту, нейрофизиологов, психологов, инженеров и программистов. Сначала будут моделироваться некоторые изученные когнитивные функции и процессы восприятия информации и формирования поведения человека. Затем, вероятно, настанет черед моделирования мышления и сознания, как основы искусственного разума. И, наконец, будет создана система искусственного разума гуманоидных роботов, которая будет обладать когнитивными и креативными способностями, которые путем автономного саморазвития могут обеспечить каждому из них собственное «Я». Естественно, что системы искусственного разума будут созданы не только для роботов, но и для сложных комплексов различного назначения, в том числе, для освоения космоса и проведения военных миссий. Вопрос только в том, насколько такие роботы или системы искусственного разума другого назначения, обладающие способностью саморазвития, будут безопасны для человеческой цивилизации.

Литература

1. Taylor J.G. On artificial brains. Neurocomputing, 74,2010, pp.50-56.
2. Л.А. Станкевич, Е.И. Юревич. Искусственный интеллект и искусственный разум в робототехнике. Учебное пособие, Изд-во СПбГПУ, С-Петербург, 2012 г., 166 с.
3. Станкевич Л.А. Когнитивные системы и роботы. Монография. Изд-во Политхнического университета. 2019, 630 с
4. Шумский С.А. Машинный интеллект. Очерки по теории машинного обучения и искусственного интеллекта / С.А. Шумский. – М.: РИОР, 2019. – 340 с.
5. Hugmann P. et al. Mapping the structural core of human cerebrial cortex. Plos. Biol. Journal. 2008, vol. 6, no.7, pp. 150-159.
6. Природа сознания. Беседы Далай-ламы с российскими учеными. Материалы Первой международной конференции «Фундаментальное знание: диалог российских и буддийских ученых». Август 2017 г.; сост. и отв. ред. В. Лысенко; ред. пер. Ю. Жиронкина. – М.: Фонд «Сохраним Тибет», 2023. – 400 с.
7. Анохин К.В. Гиперсетевая модель мозга. Презентация на конференции по когнитивной науке (17 октября 2014). 2014.

Информация об авторах

Станкевич Лев Александрович, к.т.н., доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ), Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29; в.н.с., лаборатория «Технологий искусственного интеллекта», Государственный научный центр Российской Федерации «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики» (ГНЦ РФ ЦНИИ РТК), Россия, 194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 21, Stankevich_lev@inbox.ru

Корсаков Антон Михайлович, с.н.с., лаборатория «Технологий искусственного интеллекта», ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Россия, 194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 21, anton_korsakov@mail.ru

Научно-практический опыт разработки и применения систем доверенного искусственного интеллекта в решении задач обеспечения пожарной безопасности кораблей ВМФ

И.В. Образцов
Военный учебно-научный центр Военно-Морского Флота «Военно-морская академия имени Адмирала Флота Советского Союза Н.Г.Кузнецова», Санкт-Петербург, Россия, vunc-vmf@mil.ru

Аннотация
Практическая значимость доклада заключается в повышении эффективности обеспечения взрывопожарозащищенности кораблей ВМФ за счет интеллектуального контроля пожарной опасности в корабельных помещениях, в существенном сокращении времени (не более минуты) обнаружения источников возгораний, сокращении времени проведения разведки аварийных помещений и в переходе от информационной к интеллектуальной поддержке принятия решений при борьбе с пожаром. Основной результат доклада - обоснование целесообразности внедрения комплекса технологических решений с применением доверенного искусственного интеллекта в системы активной противопожарной защиты кораблей и подводных лодок ВМФ.

Ключевые слова
Доверенный искусственный интеллект, нейронные сети, системы пожарной сигнализации, системы пожаротушения, пожароопасные ситуации, поддержка принятия решений, борьба с корабельным пожаром.

Благодарности
Работа выполняется в рамках НИР «Поиск и исследование методов и технологий искусственного интеллекта для применения в системах обеспечения пожарной безопасности кораблей», включенная в научный план ВС РФ на 2023 год и плановый 2024 и 2025 года.

Scientific and practical experience in the development and application of trusted artificial intelligence systems in solving fire safety problems of Navy ships

Ivan V. Obraztsov
Military Training and Research Center of the Navy «Admiral Naval Academy Fleet of the Soviet Union N.G. Kuznetsov», St. Petersburg, Russia, vunc-vmf@mil.ru

Abstract
The practical significance of the report is to increase the efficiency of ensuring explosion and fire protection of Navy ships through intelligent fire hazard control in ship premises, significantly reduce the time (no more than a minute) for detecting sources of ignition, reduce the time for conducting reconnaissance of emergency rooms and in the transition from information to intellectual decision-making support in firefighting. The main result of the report is the justification of the expediency of implementing a set of technological solutions using trusted artificial intelligence in active fire protection systems for ships and submarines of the Navy.

Key words
Trusted artificial intelligence, neural networks, fire alarm systems, fire extinguishing systems, fire-hazardous situations, decision support, ship firefighting.

Acknowledgements
The work is being carried out within the framework of the research project «Search and study of methods and technologies of artificial intelligence for use in fire safety systems of ships», included in the scientific plan of the RF Armed Forces for 2023 and the planned 2024 and 2025.

Процесс контроля пожарной опасности на корабле осуществляется под руководством командира корабля каждым членом экипажа по месту его нахождения, дежурно-вахтенной службой и системой пожарной сигнализации. Анализ пожаров, отмеченных на кораблях и подводных лодках ВМФ, показывает актуальную проблему: по-прежнему происходит несвоевременное обнаружение пожарной опасности, неточное определение места и характера пожара, ложные срабатывания систем пожарной сигнализации, осуществляются ошибочные действия личного состава при борьбе с корабельным пожаром.

Для повышения эффективности борьбы с корабельными пожарами на начальных этапах их развития необходимо снизить вероятность возникновения возгораний путём разработки и технической реализации раннего обнаружения, контроля и прогнозирования пожарной опасности в корабельных помещениях.

Внедрение систем доверенного искусственного интеллекта для обеспечения пожарной безопасности кораблей ВМФ позволит решить несколько важных задач:

1. Улучшение системы обнаружения и прогнозирования пожарных ситуаций на корабле. Искусственный интеллект может анализировать большие объемы информации в режиме реального времени, выявлять скрытые закономерности и предсказывать возможные пожары.

2. Ускорение реакции на пожар. Благодаря использованию искусственного интеллекта, система обнаружения пожаров на корабле будет работать быстрее и точнее, что позволит быстрее обнаружить пожар и принять меры по его тушению.

3. Снижение риска возникновения пожаров на корабле. Использование искусственного интеллекта позволит своевременно выявлять и устранять возможные причины пожаров на корабле.

4. Оптимизация использования ресурсов для пожарной безопасности. Использование искусственного интеллекта позволит эффективнее использовать доступные ресурсы для обеспечения пожарной безопасности на корабле.

Внедрение метода обеспечения пожарной безопасности кораблей ВМФ с применением искусственного интеллекта обосновывается несколькими факторами:

Во-первых, корабль ВМФ представляет сложную техническую систему, на которой имеется множество особенностей, влияющих на безопасность и способных привести к возникновению пожаров. При этом пожар на корабле может привести к катастрофическим последствиям, поэтому обеспечение пожарной безопасности является одним из приоритетов.

Во-вторых, искусственный интеллект обладает способностью анализировать большие объемы данных гораздо быстрее и точнее, чем человек. Это позволяет быстрее обнаруживать и прогнозировать пожароопасные ситуации на корабле и принимать меры по их предотвращению.

В-третьих, применение искусственного интеллекта позволяет создать интеллектуальную систему контроля и управления, включающую в себя средства диагностики и прогнозирования пожароопасных ситуаций, а также средства интеллектуального реагирования на корабельный пожар. Это снижает вероятность возникновения пожаров, а также повышает эффективность и оперативность реагирования на них.

Анализ пожаров, отмеченных на кораблях и подводных лодках ВМФ, показывает актуальную проблему в практике: по-прежнему происходит несвоевременное обнаружение пожарной опасности, неточное определение места и характера пожара, осуществляются ошибочные действия личного состава при борьбе с корабельным пожаром (см. рис. 1).

Рисунок 1 — Анализ пожаров на надводных кораблях ВМФ с 2001 по 2021 гг.

Однако существующие системы обеспечения пожаробезопасности кораблей не полностью отвечают требованиям времени, обнаружение пожаров происходит с опозданием, а время на принятие решений увеличивается, что приводит к активному развитию пожара и огромным потерям. В этой связи разработаны мной решения, позволяющие внедрить технологии искусственного интеллекта в обеспечении пожарной безопасности кораблей ВМФ.

Разработанная методика интеллектуализации системы обнаружения, локализации и ликвидации пожара на корабле ВМФ представлена на структурной схеме, отличается новым научным подходом в обеспечении предупреждения и прогнозирования развития пожароопасных ситуаций на корабле ВМФ с использованием перспективных методов искусственного интеллекта (см. рис. 2).

Методика использует основной принцип метода распознавания образов, который заключается в разбиении распознаваемой области на классы и формировании признаков, позволяющий отличать один класс (образ) от

другого, а также современные системы пожарной сигнализации и корабельного мониторинга, способны в режиме «реального времени» контролировать изменение температуры и задымленности, концентрации угарного газа в воздушной среде защищаемых помещений и появление пламени, что позволяют не только обнаруживать факт возникновения пожара, но и реализовать ряд новых функций, облегчающих принятие решений по организации процессов локализации и тушения обнаруженного системой пожара. При этом результат может быть достигнут путем разработки соответствующего алгоритмического и программного обеспечения с применением технологий нейронных сетей.

Методы и технологии доверенного искусственного интеллекта являются эффективным средством решения сложных плохо формализуемых задач. К этому направлению традиционно относятся задачи классификации, кластеризации, аппроксимации многомерных отображений, прогнозирования временных рядов, нелинейной фильтрации, управления сложными технологическими объектами. Анализ пожарной опасности технологических процессов, работы корабельных систем и технических средств показал, что одним из наиболее перспективных путей разрешения системного противоречия в обеспечении пожарной безопасности является использование методов и технологий доверенного искусственного интеллекта.

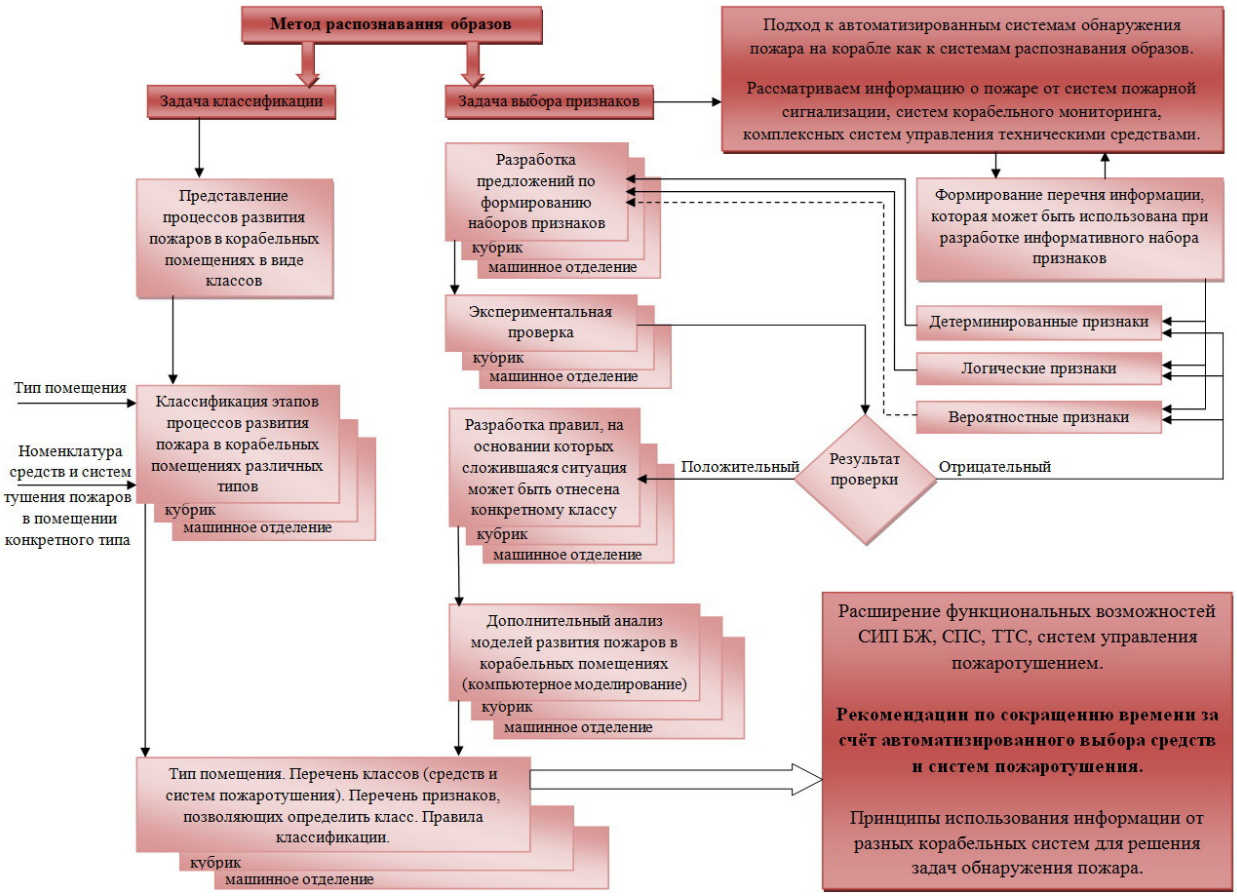


Рисунок 2 — Схема контроля и управление процессом пожаротушения на корабле ВМФ

Формируемая корабельными автоматизированными системами информация может прямо или косвенно использоваться для обнаружения начальных этапов развития пожаров, позволит усовершенствовать организацию начальных этапов тактики борьбы с корабельным пожаром, а также автоматизировать процессы пожаротушения. При этом целесообразно подойти к автоматизированным системам обнаружения пожара на корабле как к системам интеллектуального распознавания пожара и автоматического включения систем пожаротушения [1].

Основной целью информационной поддержки является сокращение времени принятия решения командным составам корабля при повседневной эксплуатации и при руководстве борьбой за живучесть, повышение обоснованности принимаемых решений и снижения количества ошибочных действий должностных лиц, обеспечение быстрого доступа к справочной информации, необходимой для обеспечения организации повседневной эксплуатации и управления техническими средствами корабля, обеспечение обучения командования и экипажа корабля.

Машинное отделение корабля является помещением повышенной взрывопожароопастности. Согласно требованиям ВМФ, в машинных отделениях кораблей устанавливаются системы пожарной сигнализации и

пожаротушения. Пожаротушение производится с использованием переносных и подручных средств пожаротушения, системы тонкораспыленной воды высокого давления с возможностью позонного включения, систем нижнего водораспыления, стационарных систем пенотушения, системы ОХТ или углекислотное тушения, массированной подачи воды или пены.

Учитывая, что распознать причину возгорания в машинном отделении можно с помощью последовательной нейронной сетью, а определить зону возникновения пожара с использованием полносвязной нейронной сетью с обратным распространением ошибки, то сможем эффективно применить соответствующие средства и системы пожаротушения в корабельном помещении, вплоть до автоматического их включения [2].

Для выполнения задач анализа данных и классификации образов производим по результатам проведения специальных огневых испытаний систем пожарной сигнализации и интеллектуального видеонаблюдения с элементами искусственного интеллекта на тестовых очагах пожара, разрабатываемых применительно к кораблям ВМФ с 9 по 13 октября 2023 года на учебно-тренировочном комплексе «Гефест» Военного института ДПО ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия» (см. рис. 3).

Рисунок 3 — Проведение специальных огневых испытаний систем пожарной сигнализации и интеллектуального видеонаблюдения

В данной практической задаче применяются мультикритериальные пожарные извещатели (МПИ), которые производят распознавание очага пожара или источника возгорания в автоматизированном режиме. Анализ пожарной ситуации с определением типа источника возгорания производился многослойной нейронной сетью прямого распространения (многослойный персептрон), обучаемой с помощью линейного дискриминтального анализа, в котором распознавание образов для поиска линейной комбинации признаков описывается (разделяется) на два или более классов (событий). Нейронные сети прямого распространения - статические сети, так как на каждый вход ими вырабатывается одна совокупность выходных значений, вне зависимости от предыдущего состояния сети. Для построения нейросетевой модели использован удобный для решения научных задач язык программирования Python, модель построения классификации Sequential и библиотека обучения Keras [3].

Вариант многослойного персептрона — это сеть с одним входным слоем нейронов, одним выходным и одним или несколькими внутренними (скрытыми) слоями нейронов. В качестве характерной особенности многослойных персептронов выступает прямонаправленной сетью. После обучения нейронной сети было установлено, что оптимальной конфигурацией является трехслойная модель (два скрытых слоя, один выходной слой) с 12-ю нейронами в скрытых слоях с разнородным набором функций активации — sigmoid для первого слоя и ReLU для второго. Конфигурация третьего слоя определяется постановкой задачи - на выходе получаем (=>sigmoid) вероятность каждого из трех (=> 3 нейрона) классов причин возникновения пожара. Структурная схема нейронной сети (см. рис. 4), отражает возможный вариант реализации полезной модели и поясняет последовательность действий.

Определение значений факторов – xi, где i - номер фактора мультикритериального пожарного извещателя. Среди факторов МПИ выделены: пламя (i=1); задымленность воздуха, % (i=2); температура, ºС (i=3); концентрация угарного газа, % (i=4). Значения на выходе - yj, где j- номер типа источников возгорания. Среди источников возгорание определены: распыл или разлитое масло, топливо (j=1); разрушение тепловой изоляции или возгорание промасленной ветоши (j=2); искрение щитового оборудования или короткое замыкание в кабельных трассах (j=3).

На выбранном языке программирования было создано два скрытых слоя и один выходной слой нейронной сети. Изменяя количество скрытых слоев и содержащихся в них нейронов, удалось добиться наиболее лучшего качества предсказательности модели. Перед началом тренировки модель была скомпилирована при помощи метода распознавания классов, что подходит для решения задачи категоризации.

Для обучения используем алгоритм обратного распространения ошибки. В результате обучения оценочная метрика приняла максимальное значение 1, что означает, что обучение проведено успешно.

Модель смогла предсказать правильную причину для трех типов очагов пожара с точностью 98,36%, 96,27% и 89,47%, что подтверждает достоверную эффективность выбранной модели.

Использование в качестве искусственной нейронной сети персептрона предложенной архитектуры позволяет осуществлять распознавание типа источника возгорания за время эффективной борьбы с корабельным пожаром.

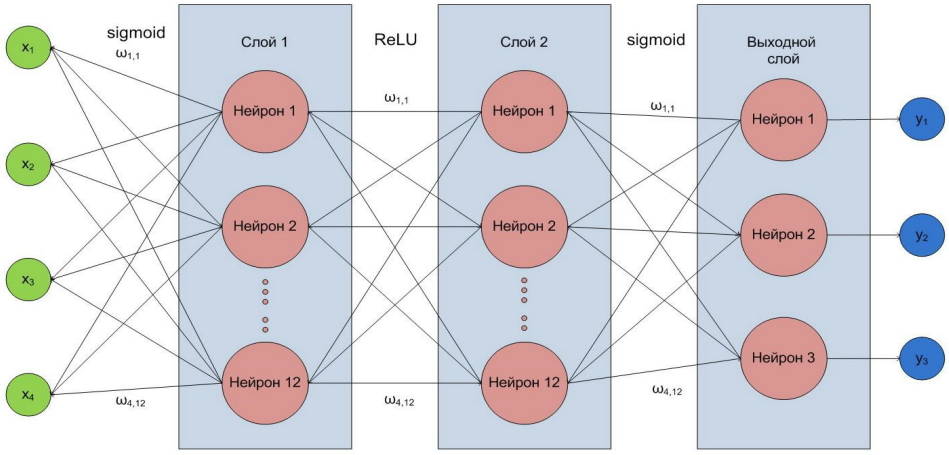


Рисунок 4 — Однонаправленная нейросетевая модель определения источника возгорания

Как показали результаты нейросетевого программирования, комбинированный алгоритм обучения персептрона данной архитектуры на принятом объеме входных данных обеспечивает быстрое обучение и достаточно высокую стабильную точность распознавания типа источника возгорания.

В машинных отделениях корабля, оборудованных автоматизированными системами тушения пожара, включение которых может осуществляться по зонам, очень важно определить место возникновения источника возгорания, чтобы включить средства тушения пожара только в нужной зоне. Использование для обнаружения очага пожара информации, получаемой от мультикритериальных пожарных извещателей системы пожарной сигнализации, позволяет достаточно точно определить их место расположения, а для решения задачи поиска расположения источников возгорания применить нейронную сеть с обратным распространением ошибки [4].

Далее было необходимо выбрать структуру нейронной сети, вид данных, подаваемых на нее, и ожидаемый выход. Для решение нашей задачи используем полносвязную нейронную сеть с обратным распространением ошибки, где функция активации - гиперболический тангенс, а обучающая функция обратного распространения - Resilient backpropagation.

Учитывая, что требуется получить место положения возгорания, то выходными параметрами будут координаты X и Y (по длине и ширине) помещения. Определить третью координату Z (высоту) не представляется возможным, так как датчики расположены на потолке и их высота постоянна. Структурная схема нейронной сети (см. рис. 5), отражает возможный вариант реализации полезной модели и поясняет последовательность действий.

Задача определения расположения источников возгорания на основе информации, формируемой системой пожарной сигнализации, была решена с применением нейронной сети. Применение генетического алгоритма при расстановке датчиков влияет не только на эффективность работы алгоритма раннего обнаружения пожара, но также и на эффективность алгоритма обработки данных, получаемых от системы пожарной сигнализации.

С помощью нейронной сети возможно получить координаты местоположения пожара с точностью порядка 65%. Этой точности, как правило, достаточно для определения зоны возгорания.

Обученная на поиск места возгорания нейронная сеть может применятся как самостоятельно, так и быть частью более сложной системы [5].

Оказалось, что, используя только экспериментальные данные, провести обучение нейронной сети невозможно. Существенным недостатком результатов, полученных из экспериментов, является то, что расположение источника возгорания и пожарных извещателей остается неизменным. Также в условиях реального пожара гореть в помещении будет не только источник возгорания, но и другие предметы, что не было реализовано в испытаниях, где после выгорания самого источника возгорания пожар прекращался [6].

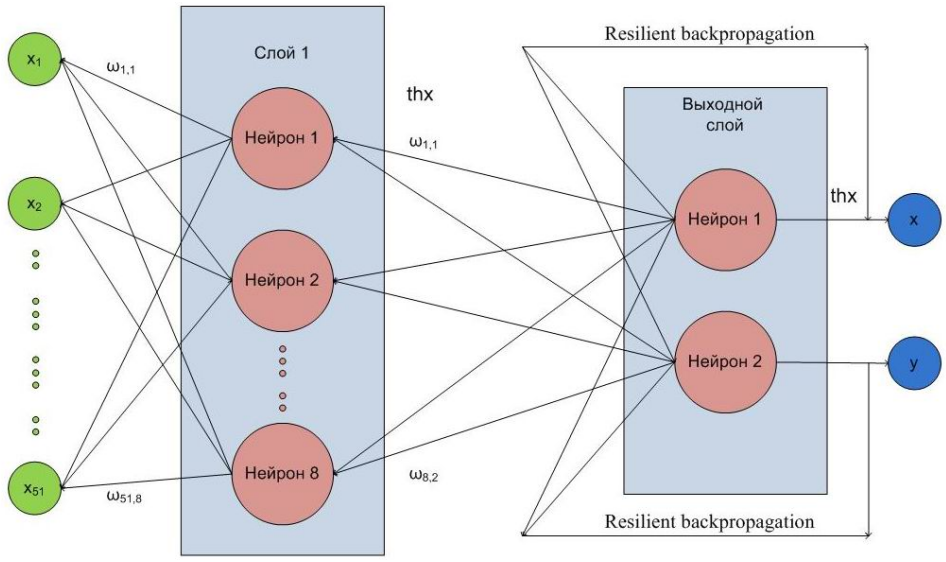


Рисунок 5 — Полносвязная нейросетевая модель с обратным распространением ошибки для определения места очага пожара

Поэтому к исходным данным были добавлены данные моделирования пожароопасных ситуаций в программе Fire Dynamics Simulator (FDS) на суперкомпьютере Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, также описан полный набор методик моделирования процессов и явлений происходящих при проведении натурных огневых испытаний, которые реализованы в ПП Логос и ПК SimInTech (см. рис. 6).

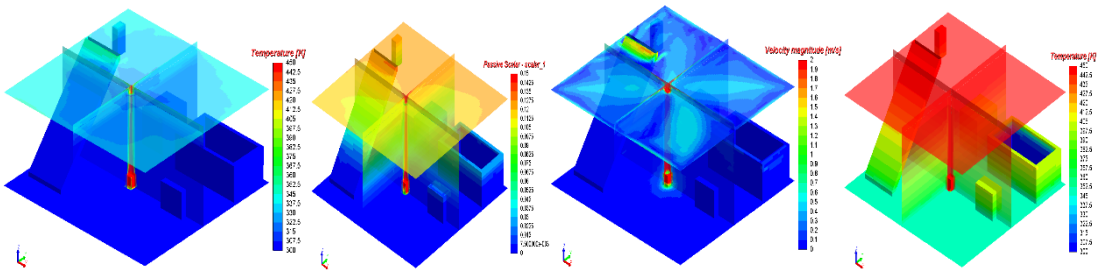


Рисунок 6 — Модель УТК по температуре и скорости развития температуры

Установлено, что параметры развития и тушения пожара являются основополагающими при расчёте количества средств и сил пожарных подразделений, необходимых для эффективной борьбы с пожарами на кораблях. Информативные признаки пожара используются в процессе пожаротушения для оценки продолжительности этапов локализации и ликвидации пожара. Доказано, что средства моделирования параметров развития и тушения пожара могут использоваться в качестве информационной основы для разработки электронных планов тушения пожаров, а также интеллектуальных систем поддержки принятия решений.

Таким образом, была разработана модель оценки степени опасности пожароопасной ситуации, основанная на системе нечёткого вывода. Данная модель обеспечивает вычислительные инструменты интеллектуальной системы обеспечения пожаробезопасности корабля вводными данными для формирования соответствующей совокупности мероприятий для принятия решений по предотвращению пожара [7].

Применение интеллектуального распознавания пожара и автоматического включения систем пожаротушения позволяет усовершенствовать тактику борьбы с корабельным пожаром. От получаемой информации о характере пожара, по его месту расположения, очагу возгорания, прогнозирования его распространения, меняется организация и порядок действий тактики борьбы с пожаром.

Принятие решений при контроле пожарной опасности на кораблях и судах обеспечения ВМФ осуществляется зачастую в условиях неопределенности с существенным запаздыванием по времени, что вызывает значительные трудности при предотвращении пожароопасной ситуации на ранней стадии. Данные обстоятельства обуславливают необходимость разработки моделей и алгоритмов в качестве средств интеллектуальной поддержки принятия решений.

Для выполнения поставленной задачи был разработан алгоритм принятия решений при контроле пожарной опасности в корабельных информационных системах.

Приведённый алгоритм может быть адаптирован под конкретный объект Военно-Морского Флота с учётом особенностей условий его эксплуатации. Также данный алгоритм должен быть адаптирован под конкретное помещение в части решающих значений факторов пожароопасной ситуации, за счёт обучения искусственных нейронных сетей при прогнозировании факторов пожароопасных ситуаций и определении степени опасности корабельного пожара. (см. рис. 7).

С целью сокращения времени, затрачиваемого на принятие решения по предотвращению пожароопасной ситуации, необходимо обеспечивать прогнозирование значений факторов ПОС. На основе обработки результатов испытаний, разработанных моделей и проведённого анализа ИНС предлагается обобщённая схема реализации прогнозирования факторов пожароопасной ситуации на корабле, представленная на слайде.

Разработку функций интеллектуального контроля пожарной безопасности планируется проводить с использованием методов и технологий доверенного искусственного интеллекта.

С практическим внедрением интеллектуального распознавания корабельного пожара происходят изменения в организации разведки района пожара, в сосредоточении сил и средств тушения в районе пожара, в локализации пожара, в процессе самого тушения.

Применение интеллектуального распознавания пожара и автоматического включения систем пожаротушения позволяет усовершенствовать тактику борьбы с корабельным пожаром. От получаемой информации о характере пожара, по его месту расположения, очагу возгорания, прогнозирования его распространения, меняется организация и порядок действий тактики борьбы с пожаром.

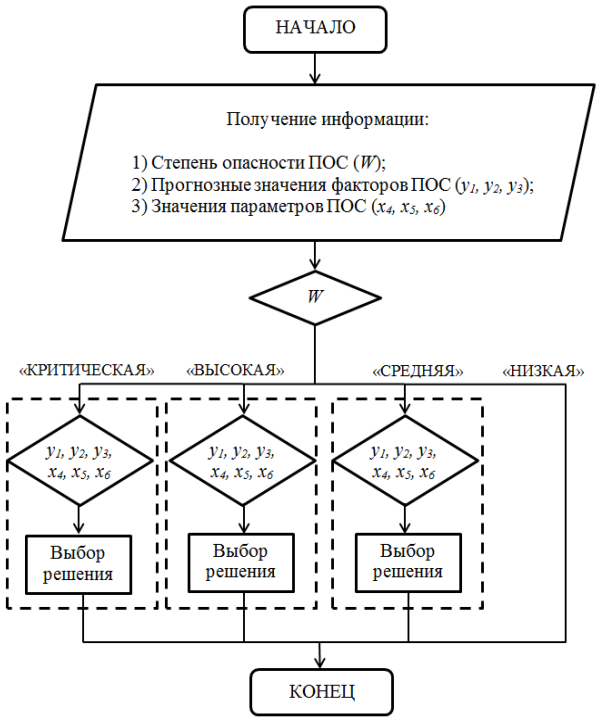


Рисунок 7 — Алгоритм принятия решений по предотвращению пожароопасных ситуаций

С целью сокращения времени, затрачиваемого на принятие решения по предотвращению пожароопасной ситуации, необходимо обеспечивать прогнозирование значений факторов ПОС. На основе обработки результатов испытаний, разработанных моделей и проведённого анализа ИНС предлагается обобщённая схема реализации прогнозирования факторов пожароопасной ситуации на корабле, представленная на слайде.

Разработку функций интеллектуального контроля пожарной безопасности планируется проводить с использованием методов и технологий доверенного искусственного интеллекта (см. рис. 8).

Комплекс информационных планшетов, адаптированных к организационной структуре корабля, представляет многоуровневую совокупность графопозиционных средств, отображающих информационные образы предметной области «корабль» и алгоритмы действия в различных ситуациях при локализации и ликвидации повреждений.

Первоочередная задача интеллектуального распознавания пожара в корабельных помещениях заключается в формировании нового облика системы пожарной сигнализации, способной обнаруживать не только возгорания и пожары, но и возникновения пожароопасных ситуаций с обоснованием принципов диагностирования средствами систем контроля пожарной опасности по месту расположения очага возгорания, источнику пожара и его развитию со временем в корабельных помещениях. Решение этой задачи должно реализо-

ваться системой информационной поддержки борьбы с корабельным пожаром по выбору средств пожаротушения и определением порядка их использования. Происходит обмен с другими корабельными системами, в том числе и с системой пожаротушения на корабле. Систему можно запрограммировать на автоматическое срабатывание того или иного средства пожаротушения, в зависимости от полного сбора информации о пожаре и его анализе.

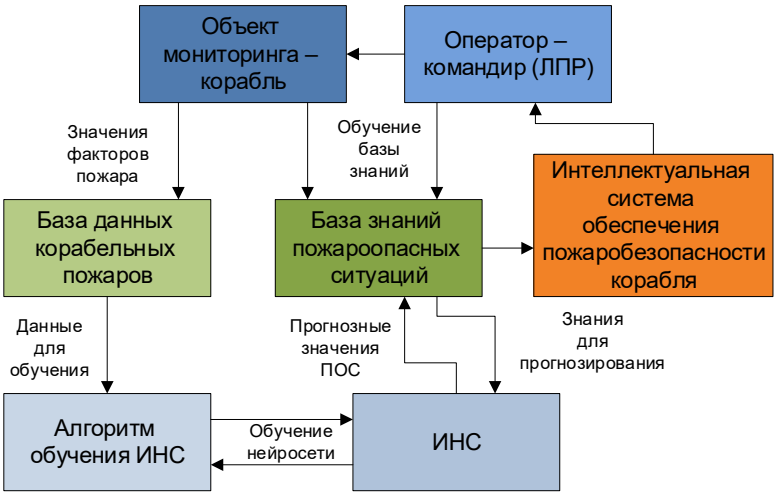


Рисунок 8 — Схема прогнозирования значений факторов пожароопасных ситуаций

С практическим внедрением интеллектуального распознавания корабельного пожара происходят изменения в организации разведки района пожара, в сосредоточении сил и средств тушения в районе пожара, в локализации пожара, в процессе самого тушения.

Применение интеллектуального распознавания пожара и автоматического включения систем пожаротушения позволяет усовершенствовать тактику борьбы с корабельным пожаром. От получаемой информации о характере пожара, по его месту расположения, очагу возгорания, прогнозирования его распространения, меняется организация и порядок действий тактики борьбы с корабельным пожаром.

Доверенный искусственный интеллект распознает и классифицирует пожароопасную ситуацию, используя различные сенсорные данные, такие как дым, температура, углекислый газ и наличия пламени. Система искусственного интеллекта также может автоматически определять местоположение и размер пожара, и предупреждать о нем руководителя по борьбе с корабельным пожаром, осуществления рекомендации по локализации и ликвидации пожара.

Кроме того, доверенный искусственный интеллект может использоваться для улучшения пожарной профилактики. Он может анализировать данные по причинам возникновения пожаров и их распространению, выявлять тенденции и определять наиболее вероятные места возникновения пожаров. Это позволяет предвидеть пожарную опасность и предпринимать меры для ее уменьшения.

Также доверенный искусственный интеллект может быть использован для управления системами пожаротушения, например, для управления автоматическими системами дозирования химических веществ для гашения пожара или для управления безопасной эвакуации личного состава корабля.

В целом, использование система доверенного искусственного интеллекта в пожарной безопасности позволяет более быстро и точно обнаружить аварийные ситуации и предотвращать пожары, что может спасти жизни людей и минимизации ущерба для корабля.

Литература

1. Образцов И.В., Круглеевский В.Н. Методика автоматизированного распознавания пожара в корабельных помещениях. Сборник научных трудов III Научно-практической конференции «Современные технологии автоматизации борьбы за живучесть (АПБЖ-2015)». СПб, Клуб Моряков-подводников и ветеранов ВМФ, 2015.

2. Образцов И.В., Круглеевский В.Н., Дягилев М.В. Усовершенствование тактики борьбы с корабельным пожаром в части обнаружения пожара, выбора и применения средств пожаротушения. Сборник трудов всероссийской научно-теоретической конференции. СПб, ВМПИ ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия», 2016.

3. Образцов И.В., Круглеевский В.Н., Наумов С.К., Кузнецов А.В. Судовое устройство определения источника возгорания мультикритериальным пожарным извещателем с использованием нейронного классификатора. Патент на полезную модель № 198734 от 24 июля 2020 г., патентообладатель: ООО «НПО Пожарная автоматика сервис».

4. Образцов И.В., Круглеевский В.Н., Гусева А.И., Малыхина Г.Ф. Способ определения местоположения очага пожара с использованием многослойного рекуррентного персептрона. Заявка на изобретение № 2021117160 от 12 декабря 2022 г., патентообладатель: ФГАОУ ВО «СПбПУ».

5. Образцов И.В., Круглеевский В.Н., Гусева А.И., Малыхина Г.Ф. Использование нейросетевой модели обработки данных в системах обнаружения пожаров для определения места возгорания. Журнал «Морские интеллектуальные технологии» № 2(44) Т.2 за 2019 г., стр.93-101.

6. Образцов И.В., Малыхина Г.Ф., Милицын А.В., Шкодырев В.П. Высокопроизводительные вычислительные комплексы в задачах модельно-ориентированного проектирования систем обеспечения живучести ВВСТ. Межведомственный междисциплинарный рецензируемый военный научно-технический журнал «Вестник Военного инновационного технополиса «ЭРА», Анапа, Технополис ЭРА, 2023.

7. Образцов И.В., Шкодырев В.П. Перспективы разработки и внедрения интеллектуальной системы обеспечения живучести. Журнал «Известия ЮФУ. Технические науки», Таганрог, 2023.

Информация об авторе

Образцов Иван Викторович, к.т.н. докторант, ФГКВ ОУВО «Военный учебно-научный центр Военно-Морского Флота «Военно-морская академия имени Адмирала Флота Советского Союза Н.Г. Кузнецова» (ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия»), Россия, 197045, Санкт-Петербург, Ушаковская наб., д. 17/1, vunc-vmf@mil.ru

Применение технологий искусственного интеллекта для очувствления технического состояния электроаппаратуры мобильных робототехнических комплексов в процессе мониторинга

М.Е. Данилин✉, О.П. Меньшиков
Общество с ограниченной ответственностью «АВАНТИ-СОФТ» (ООО «АВАНТИ-СОФТ»), г. Иннополис, Республика Татарстан, Россия, danilin.m@avgr.tech

Аннотация
Доклад посвящен использованию технологий искусственного интеллекта (ИИ) в мобильных робототехнических комплексах (РТК) для диагностики их технического состояния, аналогичного восприятию «самочувствия» у человека. Представленные решения ориентированы на проактивный подход к обслуживанию, где робот самостоятельно оценивает свое состояние, обнаруживает признаки приближения отказов и реагирует на них. Используя методы нечеткой логики и статистической классификации, доклад рассматривает реализацию системы мониторинга и предупреждения отказов для повышения автономности и надежности РТК.

Ключевые слова
Искусственный интеллект в робототехнике, мобильные робототехнические комплексы (РТК), очувствление электроаппаратуры, самомониторинг технического состояния, интеллектуальное техническое обслуживание (Smart maintenance monitoring), проактивное обслуживание, оценка технического состояния, нечеткая логика и нечеткий логический вывод, нагруженность и энергоэффективность, имитация болевого восприятия в робототехнике, нечеткая кластеризация и метод k-медиан, совместное распределение и метод ядерной оценки плотности вероятности, плоскость классов работоспособности, прогнозирование и предотвращение отказов, метрика расстояния Махаланобиса, вероятностная статистическая классификация.

The use of artificial intelligence technologies to sensitize the technical condition of electrical equipment of mobile robotic complexes in the monitoring process

Maxim E. Danilin✉, Oleg P. Menshikov
«Avanti-Soft» LLC, Innopolis, Republic of Tatarstan, Russia, danilin.m@avgr.tech

Annotation
The report is devoted to the use of artificial intelligence (AI) technologies in mobile robotic complexes (RTCs) to diagnose their technical condition, similar to the perception of «well-being» in humans. The presented solutions are focused on a proactive approach to maintenance, where the robot independently evaluates its condition, detects signs of approaching failures and reacts to them. Using fuzzy logic and statistical classification methods, the report examines the implementation of a failure monitoring and prevention system to increase the autonomy and reliability of the RTK.

Key words
Artificial intelligence in robotics, mobile robotic complexes (RTK), electrical equipment sensing, self-monitoring of technical condition, intelligent maintenance (Smart maintenance monitoring), proactive maintenance, assessment of technical condition, fuzzy logic and fuzzy logical inference, load and energy efficiency, simulation of pain perception in robotics, fuzzy clustering and the k-median method, joint distribution and the method of nuclear probability density estimation, the plane of performance classes, prediction and prevention of failures, Mahalanobis distance metric, probabilistic statistical classification.

В последние десятилетия технологии искусственного интеллекта (ИИ) играют все более важную роль в робототехнике. С развитием мобильных робототехнических комплексов (РТК) возникает необходимость в создании систем, способных не только выполнять функциональные задачи, но и самостоятельно осуществлять мониторинг своего технического состояния, что требует применения новых концепций, аналогичных понятию «самочувствия» у человека, открывающих перспективы для принципиально новых решений в технической диагностике.

В докладе рассматривается применение технологий ИИ для «очувствления» состояния электроаппаратуры мобильных робототехнических комплексов, позволяющего роботам воспринимать и анализировать собственное состояние. Внедрение таких технологий в систему управления обеспечивает выполнение задач мониторинга, прежде всего, идентификации собственного технического состояния. Предлагаются модели, которые

позволяют не только реагировать на изменение собственного технического состояния, но и предусматривающие возможность предупреждения отказов.

Группа Аванти занимается разработкой и производством мобильных роботов, в том числе, военного назначения. Не без гордости следует декларировать, что в России только наше объединение занимается реализацией стратегии «Интеллектуальное техническое обслуживание» («Smart maintenance monitoring») [1].

Национальные стандарты уже ввели в лексикон робототехники понятие «ОЧУВСТВЕНИЕ» [2]. Пока с помощью очувствления решаются задачи навигации, оценки свойств внешних предметов и взаимодействия с окружающей средой.

При этом уже почти забыты те каноны, предсказанные предшественниками теоретической робототехники, которые еще сто лет назад прогнозировали необходимость для робота собственной заботы о своем техническом состоянии. Цитаты из произведений Чапека и Азимова представлены на слайде. В контексте доклада «очувствление» предлагается понимать как восприятие собственного технического состояния.

Применительно к человеческому организму является очевидной логическая последовательность понятий «состояние здоровья» – «самочувствие» – «снижение работоспособности» – «утомляемость» [3]. Интеграция в систему управления РТК технологий ИИ, прежде всего, такой когнитивной способности как имитация восприятия собственного состояния, позволяет подобную аналогию применить к технической системе, реализуя ее в режиме реального времени.

1. Оценивать изменения в техническом состоянии, которые проявляются недостаточной эффективностью в процессе функционирования.
2. Идентифицировать этот факт.
3. Воспринимать снижение производительности системы как симптом приближающего отказа.
4. Определять показатели ухудшения через нагруженость (искусственный аналог человеческой утомляемости).

Эта логическая цепочка, поясняющая причинно-следственные связи между состоянием системы и снижением производительности, гармонично укладывается в рамки проактивной концепции технического обслуживания [4]. В настоящее время существует объективная необходимость дополнения планово-предупредительной концепции элементами других, в частности, проактивной.

Проактивная концепция постулирует, что возможные отказы изначально присутствуют в зачаточном виде во всех технических системах [4]. Что только подчеркивает аналогию с организмом человека. Различные факторы, сопровождающие эксплуатацию, в той или иной мере приближают наступление предельного состояния. Деградационные процессы, способствующие этому приближению, согласно методологии RCM (*Reliability-centered maintenance*) – (*техническое обслуживание, ориентированное на безотказность*) рассматриваются как старение, которое проявляется как снижение производительности или первоначальной мощности [5].

Применительно к промышленному оборудованию эта задача решается достаточно просто. Например, переход насоса из работоспособного состояния в предельное можно распознать по снижению его производительности. Применительно к электроаппаратуре РТК это сделать сложнее. Если рассматривать ее как динамическую систему, в которой происходит эволюция (*необратимые изменения*) собственного технического состояния, то необходимо учитывать значительное количество факторов.

Поэтому задача интегрального оценивания текущего технического состояния мобильного комплекса, которому приходится перевозить грузы в различных условиях окружающей среды на самых разнообразных ландшафтных театрах, в режиме реального времени до сих пор не решена.

Предлагается сопоставить производительность оборудования с энергоэффективностью мобильного комплекса, которая комплексно характеризует его техническое состояние.

В свою очередь, формулируется задача, как измерить эту энергоэффективность. Вводится искусственная характеристика «нагруженность» – внесистемная величина, отражающая эффективность функционирования комплекса в процессе применения по назначению и величину потребленной энергии. Численно оценивать эту характеристику предлагается с использованием нечеткого логического вывода в процессе мониторинга технического состояния.

Несмотря на то, что во многих национальных стандартах отсутствует единая дефиниция мониторинга, оптимальным видится определение железнодорожного ГОСТа, в котором обозначена его конечная цель – идентификация технического состояния [6].

Для оценивания «нагруженности» предлагается применить математический аппарат нечеткого логического вывода. В качестве входных величин, определяющих энергоэффективность комплекса, выступают скорость его движения и величина потребляемого тока, которые описываются термами понятными для человека. База правил и графики функций принадлежности для входных величин представлены на десятом слайде.

Также на основе базы правил формируется «плоскость классов работоспособности».

Нечеткий логический вывод реализуется с использованием импликации Мамдани по правилу вывода «MODUS PONENS» [7]. Для выходной величины устанавливаются термы: легкое, умеренное, тяжелое и критическое. Также предлагается визуализация интервалов нагруженности в соответствии с определенным оттенком спектра видимого света.

Оценивание технического состояния осуществляется в режиме реального времени. Графики временных рядов скорости движения робота, величины потребляемого тока и нагруженности на входе и после процедуры нечеткой импликации представлены на двенадцатом слайде.

Предварительная обработка временных рядов входных величин с использованием кубического сплайна и фильтра Калмана. Для сглаживания временного ряда нагруженности предлагается использовать оператор простого скользящего среднего.

Те временные промежутки, на протяжении которых значение нагруженности будет превышать критическое значение, предлагается ассоциировать с приступами боли. Разумеется, на данном этапе исследований при отсутствии у робота сознания, эта ассоциация будет весьма условной.

На четырнадцатом слайде «приступ боли» показан более подробно. В соответствии с масштабом графика его продолжительность составляет примерно 1,1 с.

Если в текущий момент констатируется критические значения нагруженности, подобно болевым ощущениям, возникающим у человека, то этот факт необходимо зафиксировать. С этой целью предлагается использовать нечеткую кластеризацию, в частности, метод *k*-медиан. Для каждого момента критического периода фиксируются координаты точек в четырехмерном пространстве. Затем оценивается расстояние между точками, соответствующих «приступу боли». Очередной центр кластера переносится в середину отрезка. Проекции точек, попадающих в кластер, фиксируются на плоскости классов работоспособности.

На момент завершение приступа синтетической боли по выборочной совокупности производится оценка центральных моментов входных величин. Прежде всего, рассчитываются статистические характеристики выборки и подтверждаются гипотезы о законах распределения. Проводится интервальная оценка попадания значений скорости и потребляемого тока во временной промежуток приступа.

Тот факт, что одна случайная величина является зависимой от другой значительно усложняет процедуру идентификации. Для генерации совместного распределения для этих величин применяется метод ядерной оценки плотности вероятности [8,9]. Применение этого метода для построения поверхности совместного распределения двух зависимых случайных величин позволяет корректно и эффективно создать основу модели изменения технического состояния. Важным достоинством метода ядерной оценки плотности вероятности является адаптация совместного распределения к зависимости переменных, которая нивелирует проблему независимости для традиционного классификатора «Наивного Байес» [10], позволяющего оценить апостериорную вероятность принадлежности приступа боли к предельному состоянию.

Предлагается визуализация приступов синтетической боли как объемных фигур внутри «холмов» (выделены эллипсами), которые располагаются на плоскости классов работоспособности. Оси абсцисс и ординат соответствуют значениям входных величин, а ось аппликат – значениям плотности вероятностей текущих состояний.

С учетом отсутствия эксплуатационных данных на начальном этапе имеется только возможность гипотетической формализации критического состояния, которое будет характеризоваться сочетанием «большой потребляемый ток» и «низкая скорость движения». Параметрическая модель возможного отказа для подобного сочетания на начальном этапе сопоставляется точке на дальней стороне прямоугольника класса работоспособности «критический». Разумеется, в процессе обучения модели предполагаемое местоположение отказа на плоскости классов работоспособности будет уточняться.

Динамику изменения технического состояния предлагается оценивать по движению «холмов»: приближению или удалению от гипотетического отказа.

Решение задачи идентификации технического состояния на основе методов статистической классификации предполагает, что различные состояния системы связаны с классами работоспособности экстраполяционными связями, которые характеризуются апостериорными вероятностями. На этапе, когда исследования проводятся только на начальном этапе эксплуатации робота, речь идет об обучении предлагаемой модели распознавания – определении вероятностей приступов боли и закономерностей их миграции по плоскости состояний. Эти закономерности послужат исходными данными для перехода от мониторинга к выполнению задач прогнозирования: предупреждению о приближении предельного состояния.

Для решения этой задачи оптимально подходит метод ближайших соседей [11]. В качестве функции расстояния предлагается назначить метрику, с использованием которой можно принимать решение о приближении предельного состояния. Принимая во внимание то, что совместное распределение под влиянием процесса старения перемещается в вероятностном пространстве, необходимо выбрать меру, которая широко задействуется в методах классификации. Лучшим вариантом является расстояние Махаланобиса [12]. Последовательность расчета этой метрики представлена на слайде.

Таким, образом, в докладе представлен математический аппарат, основанный на вероятностных методах нечеткой статистической классификации. Данная методология позволяет формализовать приближение предельного состояния электроаппаратуры, что, в свою очередь, способствует развитию инновационных подходов к техническому обслуживанию. Данное направление может стать основой совершенствования интеграции технологий ИИ в системы управления комплексов, способствуя улучшению их автономности.

Литература

1. Autonomy / [Электронный ресурс] // MILREM ROBOTICS. – URL: https://milremrobotics.com/autonomy/ (дата обращения: 27.05.2024).
2. ГОСТ Р 60.6.0.1-2021. Роботы и робототехнические устройства. Сервисные мобильные роботы. Уровни автономности. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2021. – 6 с.
3. Стрижакова О.В., Орлов В.А., Фетисов О.Б. Про здоровье, самочувствие и работоспособность человека // Ученые записки университета имени П.Ф. Лесгафта № 11 (213). — Санкт-Петербург: Национальный государственный Университет физической культуры, спорта и здоровья, 2022. — С. 535-539.
4. Проактивная концепция ТОиР / [Электронный ресурс] // Ассоциация EAM: [сайт]. – URL: https://eam.su/proaktivnaya-koncepciya-toir.html (дата обращения: 27.05.2024).
5. SAE JA1011. Руководство по стандарту технического обслуживания для обеспечения надежности (Reliability-Centered Maintenance, RCM), 2002. – 56 с.
6. ГОСТ 34913-2022. Системы технического диагностирования и мониторинга железнодорожной автоматики и телемеханики высокоскоростных железнодорожных линий. Общие технические требования. Введ. с 20.06.2024. – М.: Изд-во стандартов, 2023. – 14 с.
7. Заяра А.В., Данилин М.Е. Применение нечеткого логического вывода для моделирования процесса изменения технического состояния электроаппаратуры мобильных робототехнических комплексов // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 2. С. 120–125. doi: 10.21685/2307-4205-2024-2-14.
8. Лапко А.В., Лапко В.А. Анализ эффективности методов дискретизации области значений двумерной случайной величины при синтезе непараметрической оценки плотности вероятности // Информатика и системы управления. Стохастические системы. – 2016. – №3(49). – с. 78-85.
9. Епанечников В. А. Непараметрическая оценка многомерной плотности вероятности [Электронный ресурс] // Общероссийский математический портал: [сайт]. – URL: https://www.mathnet.ru/links/614b29a5189e7b2f12 deb4487f018c1c/tvp1130.pdf (дата обращения: 10.10.2024).
10. Changbo Zhu. A Hierarchical Bayesian Model for Inferring and Decision Making in Multi-Dimensional Volatile Binary Environments / [Электронный ресурс] // SCISPPACE: [сайт]. – URL: https://typeset.io/papers/a-hierarchical-bayesian-model-for-inferring-and-decision-11s9rd2b (дата обращения: 15.10.2024).
11. Alex Mashanski. Метод k-ближайших соседей (k-nearest neighbour) / [Электронный ресурс] // Proglib: [сайт]. – URL: https://proglib.io/p/metod-k-blizhayshih-sosedey-k-nearest-neighbour-2021-07-19 (дата обращения: 10.10.2024).
12. Malalanobis distance between two multivariate Gaussian distributions / [Электронный ресурс] // Stack Exchange Network : [сайт]. – URL: (дата обращения: 16.10.2024).

Информация об авторах

Данилин Максим Евгеньевич, директор, общество с ограниченной ответственностью «АВАНТИ-СОФТ» (ООО «АВАНТИ-СОФТ»), Россия, 420500, Республика Татарстан, г. Иннополис, ул. Университетская, д. 7, пом. 602, а/я № 16, danilin.m@avgr.tech

Меньшиков Олег Павлович, начальник методического центра, ООО «АВАНТИ-СОФТ», Россия, 420500, Республика Татарстан, г. Иннополис, ул. Университетская, д. 7, пом. 602, а/я № 16, metod@avgr.tech

Программная система для решения задач понимания изображений в реальном времени

К.И. Кий
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт прикладной математики им. Келдыша Российской Академии Наук (ИПМ РАН), Москва, Россия, konst.i.kiy@gmail.com

Аннотация
В работе предлагается программная система для решения большого числа задач понимания изображений реального мира в реальном времени. Система основана на методе геометризованных гистограмм (GHM), разработанном автором. В системе основная работа с массивом изображения выделена в отдельную функцию, к которой можно многократно обращаться, меняя обработку по горизонтальным и вертикальным полосам, или обеспечивая рассмотрение пары изображений для стереозрения. Также можно работать дополнительно с отдельными частями изображений и накопленными данными обработок по последовательностям. Выделение отдельной функции для работы с массивами изображений позволяет применять распараллеливание обработки для ускорения работы системы. Разработанная программная система позволяет развить новые подходы к задачам анализа движения в кадре и стереозрения, а также улучшить работу алгоритмов понимания изображений, разработанных автором в предыдущих публикациях путем одновременной обработки массивов изображений при разбиении изображений на вертикальные и горизонтальные полосы.

Ключевые слова
Компьютерное зрение, сегментация изображений, программная система, понимание изображений в реальном времени.

A programming system for real-time solving image understanding problems

Konstantin I. Kiy
Keldysh institute of applied mathematics of RAS, Moscow, Russia, konst.i.kiy@gmail.com

Abstract
In this paper, a programming system for real-time solving a big number of image-understanding tasks is proposed. This system is based on the Geometrized Histograms Method (GHM) developed by the author. In this system the main work with image array is separated in a particular function, which can be called repeatedly, alternating operations with results obtained under processing the image using divisions by horizontal and vertical strips, or providing the consideration of pairs of different images (stereo pair) simultaneously. It is also possible to deal with selected parts of the image and accumulated data from processing image sequences. The separation of a particular function for dealing with image arrays allows one to parallelize processing for accelerating operation of the system. The developed system allows one to develop new approaches to problems of motion analysis in the frame and stereo vision, as well as to improve the image understanding algorithms developed by the author in previous publications using simultaneous results of processing image arrays with divisions into vertical and horizontal strips simultaneously.

Key words
Computer vision, image segmentation, programming system, image understanding.

Введение

В последнее время существенное внимание уделяется применению компьютерных методов анализа сцен, содержащих кадры реального мира, который окружает нас. Естественным образом результаты находят многочисленные применения при решении практических задач в различных сферах от анализа транспортных потоков, снятых как со стационарных камер, так и с камер, установленных на движущихся транспортных средствах, до создания ассистирующих и беспилотных систем в различных областях применения. Все более тонкие результаты компьютерного зрения требуются при создании ассистирующих систем помощи водителю, а также автоматических систем управления различных роботов от наземных беспилотных средств до воздушных, надводных и подводных дронов. Большие успехи были достигнуты применением методов глубокого обучения нейронных систем. Однако, довольно часто эти системы допускают неоднозначные выводы, что привело к большому числу аварий беспилотных автомобилей с тяжелыми последствиями. Известна авария с погибшим водителем, в которой грузовик, подрезающий беспилотный автомобиль, был воспринят как небо. Также есть пример, когда автоматическая система вождения неправильно оценила достаточно попорченную разметку и сокрушила несколько автомобилей, включая полицейский, стоящих на обочине. Также в сети есть

ролик, который показывает, как машина под управлением системы Tesla крушит несколько объектов, включая макет ребенка на самокате, который пересекает ее путь.

Выделение возможного соседнего объекта с помощью прямоугольника нуждается в подтверждении с одной стороны, и в более детальном анализе выделенного объекта, с другой стороны. (Например, выделение системой Tesla придорожного киоска в качестве автомобиля с вероятностью 70% ничего кроме удивления не вызывает.) Интересно также отметить, что мало работ посвящено качественной оценке выделенных объектов. Например, в случае с аварией с плохой разметкой, прежде чем принимать решение о следовании с учетом этой разметки, естественно было бы оценить, насколько выделенная разметка качественная и можно ли ее использовать при принятии решений. Использование небольшого набора сайтов для обучения программ и определения качества их работы с помощью определения процента успешных распознаваний без процедур определения качества выделенных объектов и их соответствия ожидаемому образу, вызывает очень большое сомнение. Особенно актуален точный анализ при работе с плотным потоком объектов с заслонениями.

Имея в виду указанные выше мотивировки, автор инициировал разработку программной системы, внутри которой можно было бы не только выделять желаемые объекты, но и можно было бы получать подтверждения соответствия выделенных объектов их имеющимся образцам. Также интересным кажется применения разработанной системы к анализу движения в кадре и к задаче стереозрения.

В разделе 1 кратко описывается техника GHM, используемая в работе. В разделе 2 описывается структура разработанной системы понимания изображений. В разделе 3 описывается набор задач, которые решаются или могут быть решены с помощью разработанной системы. Также описываются возможности улучшения имеющихся решений и получения решения новых задач за счет одновременного использования сжатых описаний изображения на основе его разбиений на горизонтальные и вертикальные параллельные полосы. Дополнительные уточнения деталей (например, при анализе дорожных знаков и любых малых объектов интереса) получаются при построении описания кусков изображения на основе цветовых сгустков локальных частей изображения.

Краткое описание техники GHM, использованной в работе

Обработка изображений в разработанной системе основаны на методе геометризованных гистограмм (GHM), разработанном в [1–3] и реализованном с помощью параллельных вычислений в [4]. С помощью разработанной техники, описанной в [1–4], каждому цветному изображению ставится в соответствие структурный граф цветовых сгустков *STG.* При построении *STG* изображение разбивается на полосы одинаковой ширины St_n со сторонами параллельными горизонтальной или вертикальной оси плоскости изображения *Os*. Разработанная система использует два графа STG_v и STG_h, построенных как для вертикального разбиения, так и горизонтального. Это объясняется тем, что в разных задачах можно использовать разные типы разбиений, и объединение типов помогает получить новое качество решения в разных задачах. Вводится понятие геометризованной гистограммы изображения [1], которая является далеким обобщением обычной гистограммы и учитывает не только частоты появления цветовых характеристик изображения, но и описывает геометрию распределения цветов на плоскости изображения. Это дает возможность иметь сжатое описание изображения, которое содержит в себе описание его геометрии. Это описание дает возможность не только выделять объекты на изображении, но и устанавливать пространственные связи между этими объектами.

Получается геометризованная гистограмма с помощью проектирования пикселов полосы на ее нижнее основание. Удается при проектировании разделить всё множество точек полосы на подмножества, в которых насыщение, оттенок и яркость варьируются в некоторых диапазонах. В каждой полосе получаются системы интервалов, каждый из которых *Sg* характеризуется следующими параметрами:

- Положение интервала $[beg_{Sg}, end_{Sg}]$ *Sg* на оси *Os*.
- Диапазон $\Delta_H{}^{Sg} = [H_{min}{}^{Sg}, H_{max}{}^{Sg}]$ и среднее значение оттенка $H_{mean}{}^{Sg}$.
- Диапазон $\Delta_S{}^{Sg} = [S_{min}{}^{Sg}, S_{max}{}^{Sg}]$ и среднее значение $S_{mean}{}^{Sg}$ насыщения.
- Диапазон $\Delta_I{}^{Sg} = [I_{min}{}^{Sg}, I_{max}{}^{Sg}]$ и среднее значение яркости $I_{mean}{}^{Sg}$.
- Мощность интервала $Card^{Sg}$ (приблизительно равна числу точек полосы, лежащих в полосе над интервалом с цветовыми характеристиками, заключенными в интервалах, указанных выше для *Sg* на оси *Os*).

Обозначим $dens(Sg) = Card^{Sg}/(end_{Sg} - end_{Sg} + 1)$ плотность интервала *Sg*.

Геометризованная гистограмма получается за один проход массива изображения [1, 4], что дает возможность строить ее в реальном времени. С помощью оригинальной операции кластеризации [1] интервалы геометризованной гистограммы объединяются в цветовые сгустки *g,* которые характеризуются такими же, как и у интервалов *Sg*, составляющих данный сгусток, яркостно-цветовыми параметрами, мощностью и плотностью. Цветовые сгустки объединяются в граф. В полосе соединяются ребром соседние цветовые сгустки (с соседними интервалами локализации), а в соседних полосах – цветовые сгустки, интервалы локализации которых пересекаются. Неформально, каждый сгусток дает описание некоторой части реального объекта в полосе, его проекцию на ось *Os* и описание значений численных цветовых характеристик этой части объекта. *STG* можно интерпретировать геометрически с помощью наложения интервалов локализации его сгустков

([beg_b, end_b]) на центральную линию соответствующей полосы и окрашивания этих отрезков в цвет, определяемый $H_{mean}{}^b$, $S_{mean}{}^b$, $I_{mean}{}^b$. На изображениях рисунков 1 и 2 приведен примеры графов *STG*, наложенных на полутоновую компоненту соответствующего цветного изображения, построенных для горизонтальных и вертикальных разбиений. Алгоритмы построения геометризованной гистограммы и графа *STG* в деталях описаны в [1–4].

С помощью программы находящейся на [6] можно построить и визуализировать геометризованную гистограмму и множество цветовых сгустков для любого изображения в формате BMP (на сайте имеется инструкция для пользователя этой программы). Поэтому читатель может детально ознакомиться с введенными понятиями.

Построение графа цветовых сгустков можно распараллелить [4] и реализовать в реальном времени на достаточно медленных процессорах с несколькими ядрами [4] или на компьютерах с достаточно большим числом не очень быстрых процессоров. Например, в принципе, возможна реализация программы на процессорах современных мобильных телефонов, что дает возможность применять развитые методы сегментации при определении положения дронов по изображениям местности и положения объектов интереса на земле в реальном времени в бортовом варианте разработанной системы.

На множестве цветовых сгустков строится «решетка поиска» SearchLat (*STG*) [3], которая позволяет производить глобальный анализ изображения. Если мы положим на среднюю линию каждой полосы разбиения изображения интервалы геометрической локализации [beg_b, end_b] всех цветовых сгустков полосы, то получаем некоторое ее покрытие. Введем плотность цветового сгустка как $dens(b) = Card^b / L([beg_b, end_b])$ (мощность, деленная на длину интервала). Цветовые сгустки, имеющие в некоторой точке средней линии максимальную плотность, называются доминирующими цветовыми сгустками. Ясно, что доминирующие цветовые сгустки образуют покрытие средней линии. Оказывается [3], что всегда можно выбрать линейно-упорядоченную последовательность базисных цветовых сгустков, которые образуют покрытие средней линии. Доминирующие цветовые сгустки, включенные в линейно-упорядоченное покрытие, называются базисными цветовыми сгустками. Базисные цветовые сгустки всех полос образуют решетку поиска изображения SearchLat (*STG*) [3]. Решетка поиска состоит из линейно упорядоченных цепочек доминирующих цветовых сгустков, покрывающих ось *Os*. С помощью решетки поиска можно определять какие объекты лежат рядом с выделенным объектом и чем эти объекты разделяются. Например, наличие неба или растительности между некоторыми частями графа цветовых сгустков препятствуют тому, что они часть единого объекта. Многие задачи по поиску ориентиров и объектов в кадре, можно переформулировать строго как задачи поиска некоторых абстрактных объектов на графе цветовых сгустков. На решетке поиска строятся почти вертикальные (горизонтальные) контура, которые соединяют концы контрастных цветовых сгустков в разных полосах и имеют почти вертикальное (горизонтальное) направление. Почти вертикальные (горизонтальные контура изображены синими линиями на изображении графа цветовых сгустков рисунков 1 и 2. С помощью техники, разработанной в [3] также выполняется сегментация графа цветовых сгустков и оцениваются параметры полученных выделенных частей графов STG_v и STG_h с целью отождествить выделенные области с реальными объектами в кадрах.

Рисунок 1 — Цветовые сгустки, наложенные на черно-белую компоненту (разбиение на горизонтальные полосы)

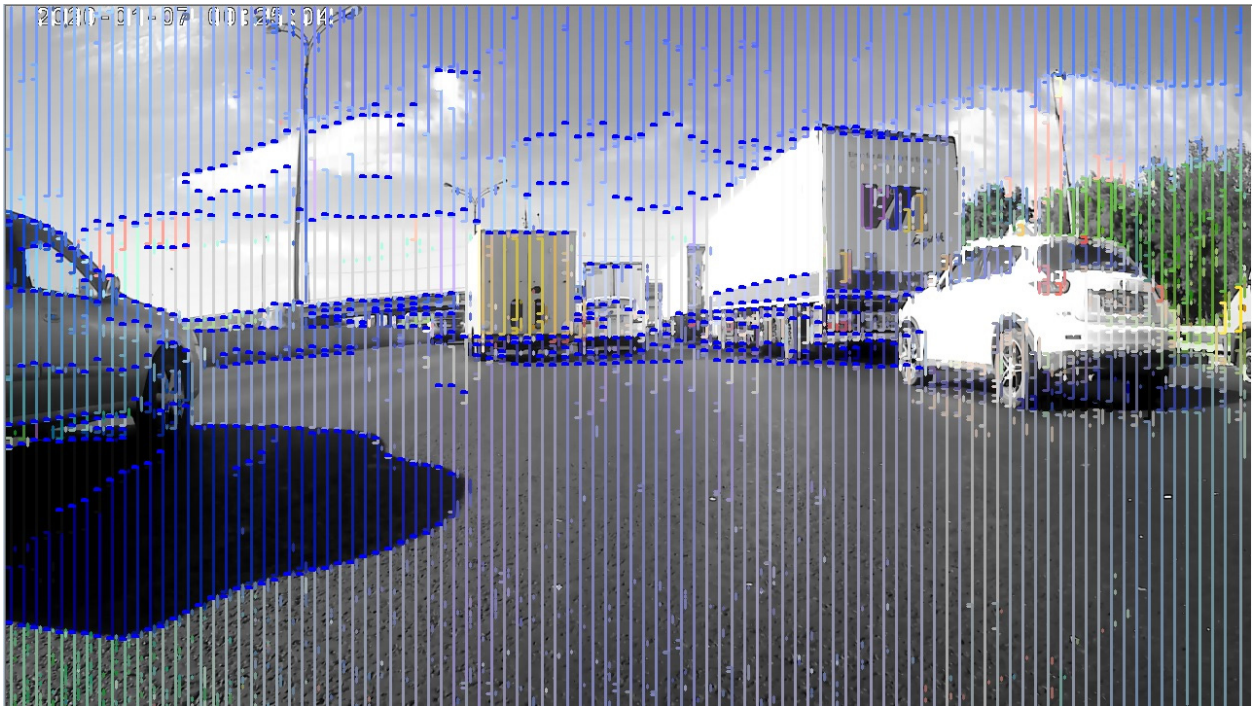


Рисунок 2 — Цветовые сгустки, наложенные на черно-белую компоненту (разбиение на вертикальные полосы)

Из рисунков 1 и 2 видно, что представления изображения с помощью STG_v и STG_h во многом дополняют друг друга. Представление STG_v лучше выделяет горизонтальные объекты (отбойник, мост, окна легковых автомобилей, автомобили, которые видны под углом) и дает пиксельную оценку их вертикальных границ. В то время как STG_h лучше описывает объекты близкие к вертикальным и дает пиксельную оценку их горизонтальных границ.

Базисный блок и структура разработанной системы понимания изображений

Опишем вначале базисный блок разработанной системы, в котором осуществляется основная работа с полученным изображением. Эта работа с массивом изображения производится внутри функции построения сжатого описания изображения с помощью набора структур, описывающих графы цветовых сгустков STG_v и STG_h, построенные на основе разбиений изображения на параллельные полосы указанных двух типов. Данная функция реализована двумя способами с помощью изолированной процедуры или с помощью dll (под Windows). Для внешнего пользователя разработанной программной системы не нужно вникать в суть данной процедуры, а можно только пользоваться ее результатами. Это важно, так как несмотря на возможность работы в реальном времени процедура имеет сложную природу и содержит большой и сложный для понимания код. Основные принципы работы этой функции описаны в работах автора [1—3]. На вход процедуры построения цветовых сгустков подаются следующие данные (unsigned char* ImageData, int ImageSizex, int ImageSizey, int NumOfStrips, int TotalNumberofFrames, bool HorizVert). В порядке следования: указатель на массив изображения, его размерности, число полос в разбиении изображения и булева переменная, которая дает выбор между горизонтальными и вертикальными полосами. Описание изображения выдается с помощью массива структур TIntColored и TIntColoredCharacteristics. Структура TIntColored содержит следующие элементы (приводятся только параметры, используемые в дальнейших разработках): num_of_int (число цветовых сгустков в полосе), int* BegInterv; и int* EndInterv (массивы начал и концов интервалов цветовых сгустков на горизонтальной или вертикальной оси изображения), и массивы, описывающие цветовые характеристики цветовых сгустков: int* LowerGrayscale, int* UpperGrayscale, int* AverageGray, int* LowerHueValue, int* UpperHueValue, int* AverageHue, int* LowerSatValue, int* UpperSatValue, int* AverageSat. Массивы дают представление о числе пикселов в полосе с указанными цветовыми характеристиками, которые определяют данный цветовой сгусток int* Significance. Структура TIntColoredCharacteristics описывает процесс предварительной сегментации цветовых сгустков в полосе и взаимоотношение цветовых сгустков с их соседями. Также в каждой полосе выбирается минимальное число упорядоченных цветовых сгустков, и структура описывает эти сгустки. Эта структура содержит следующие члены (приводятся только члены, используемые в дальнейших разработках): int Max_number (максимальное число цветовых сгустков, проходящих через одну точку полосы), int num_of_bunches (общее число первоначальных сгустков), int num_of_refined_bunches (число результирующих цветовых сгустков после предварительной сегментации), int disordering (показатель успешности выбора упорядоченной последовательности цветовых сгустков покрывающих полосу; принимает значения -1 - неудача,

0 – удача, два - частичная удача и int last_ordered_end дает точку на оси до которой процедура дошла успешно), int number_of_bunches_in_ordered_covering (число сгустков в покрытии), int* bunch_blocking (определяет, какие сгустки остались или поглощены при сегментации, 0 – остались, n +1 – номер поглотившего сгустка), int* left_continuation, int* right_continuation, int* left_adjacent, int* right_adjacent, int* new_left_continuation, int* new_right_continuation, int* new_left_adjacent, int* new_right_adjacent (определяют степень контраста левого и правого соседа, номера левого и правого соседей в первоначальных сгустках и в тех, что получились в результате предварительной сегментации), int* ordered_bunch_number, int* old_ordered_bunch_number, int* new_bunch_number, int* old_bunch_number (определяют упорядоченный номер сгустка в выбранном покрытии, обычный номер сгустка в упорядочивании, новый номер сгустка после сегментации и его старый номер соответственно, Массив int* visible_bunches дает представление в какой степени цветовой сгусток является наиболее плотным на всем своем протяжении (значение от 0 до 16, 0 – если сгусток покрыт более плотными сгустками, *l* – если сгусток наиболее плотный на *l/16* части его длины.

Все дальнейшие действия программной системе производятся с на основе двух описанных структур, описывающих цветовые сгустки в полосах. Программная система содержит следующие блоки, которые структурно описываются соответствующими классами C++. Структурная схема разработанной программной система приведена на рисунке 3.

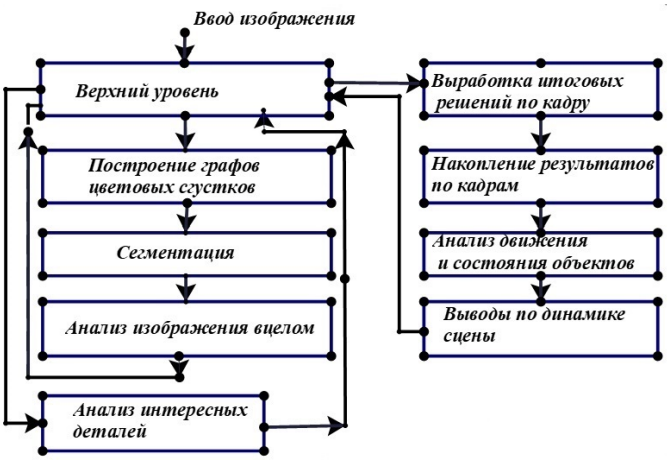


Рисунок 3 — Структурная схема разработанной программной системы

Задачи понимания изображений, которые решаются с помощью разработанной системы

В предыдущих работах автора разработаны подходы к решению задач понимания изображений дорожных сцен, основанные на работе с графом STG_h. Исследовались следующие задачи [3, 7, 8]:

1. Задача выделения области неба в кадре.
2. Задача выделения растительных областей, ограничивающих дорогу.
3. Задача нахождения дорожной разметки как постоянной, так и временной.
4. Задача нахождения транспортных средств на дороге и их сигнальных зон.
5. Нахождение светофоров и сигнальных огней летающих объектов (например, вертолетов).

При решении этих задач были получены достаточно хорошие результаты. Однако, отдельные элементы дорожных сцен такие как отбойники, стоп линии трудно достаточно надежно находить с помощью графа STG_h. Аналогичным образом, транспортные средства, движущиеся в перпендикулярном направлении на перекрестке также гораздо надежнее находить с помощью графа STG_v. Кроме того, работа одновременно с STG_v и STG_h позволяет не только более точно определять разрыв в переходе от сплошной разметки к прерывистой, но и перейти к задаче определения качества самой разметки. Одновременное изучение образов разметки в графах STG_v и STG_h позволяет находить плохие места в деталях разметки, а также находить части разметки, расположенные вдали от части дороги, в которой движется автомобиль (в этом случае разметка слишком тонкая и теряется в STG_h. Также применение двух описаний позволяет отбрасывать фальшивые варианты разметки, которые могут возникать из-за частей пересветок на автомобилях, отбойнике, дороге и т.д. Данным результатам будет посвящена отдельная публикация. В задаче нахождения транспортных средств и их сигнальных зон применение обоих графов STG_v и STG_h также позволяет улучшить результаты особенно для автомобилей на боковых, относительно автомобиля с камерой, полосах движения.

Следует отметить, что использование STG_v дает лучший результат для протяженных объектов, у которых горизонтальные размеры существенно больше вертикальных. К этим объектам относятся транспортные средства на других полосах движения или движущиеся в перпендикулярном направлении, отбойники, мосты. Изучение изображений, полученных в каналах Telegram и снятых с дронов показывает, что использование STG_v более эффективно при нахождении таких протяженных объектов как рвы, окопы, бетонные заграждения, реки

и дороги, расположенные под достаточным углом к направлению движения дрона. В то же время вертикальные объекты типа столбов, мачт, высотных зданий лучше находятся с помощью STG_h.

В настоящее время в блоке 9 структурной диаграммы реализован блок накопления цветовых сгустков, у которых ненулевая заметность, т.е. значение параметра visibility, не равна нулю. Неформально это означает, что он представляет какую-то часть полосы (как бы является в этой части фоном). В совокупности такие цветовые сгустки хорошо представляют все изображение. Производится накопление таких представлений для последовательности изображений определенной длины. Какой-то набор для определенного кадра принимается за эталонный. Путем сравнения поступающих представлений сцены для следующих кадров с эталонным находятся изменения сцены. Также производится сегментация эталонного представления и поступающего. Решаются вопросы, связанные с изменением эталонного представления с тем, чтобы учесть изменения в сцене. Это дает развить новый подход к задаче анализа движения, который даст возможность изучать динамику дорожной сцены. Данному решению этой классической задачи об анализе движения будет посвящена отдельная публикация.

Также решается задача накопления данных по состояниям сигнальных зон автомобилей, находящихся в кадре и определения изменений в их состоянии (определение начала торможения, включение поворотника). Разработанные технические возможности позволят решать задачу связи изменения состояния сигнальных зон с обнаружением изменений в движении соответствующего автомобиля. Что позволит выделить случай отсутствия торможения при включенных сигналах из-за неисправности в электрической системе автомобиля или отсутствия поворота при не выключенном по ошибке сигнале поворота.

Так как STG_v дает пиксельную точность в положении объекта по вертикали, а STG_h обеспечивает пиксельную точность по горизонтали, а сегментация представлений с помощью STG_v и STG_h позволят находить соответствие между объектами на кадрах стереопары, то естественно применить глобальный подход в стереозрении, развитый в большом количестве работ [5]. В настоящий момент эта возможность исследуется.

Заключение

В работе разработана программная система для решения задач понимания изображений в реальном времени. Приведена ее структурная схема и даны оценки ее производительности. Очерчены пути ее использования и выделены задачи, в которых она применяется и будет применяться. Предложены новые способы решения задачи обнаружения движения в кадре и намечены возможные применения в решения задач стереозрения.

Литература

1. K.I. Kiy, A new real-time method for description and generalized segmentation of color images// Pattern Recognition and Image Analysis. 2010. N. 2. P. 169-178. DOI: 10.1134/S1054661810020082

2. K.I. Kiy Segmentation and detection of contrast objects and their application in robot navigation // Pattern Recognition and Image Analysis. 2015. N. 2. P. 338-346. DOI: 10.1134/S1054661815020145

3. K.I. Kiy A new method of global image analysis and its application to understanding road scenes, // Pattern Recognition and Image Analysis. 2018, N. 3, p. 483-495. DOI: 10.1134/S1054661818030100

4. К.И. Кий, Д.А. Анохин, А.В. Подопросветов, Программная система обработки изображений с параллельными вычислениями, // Программирование. 2020. № 6. 38-50. DOI: 10.31857/s0132347420060047

5. N. A. Manap, S. F. Hussin, A. M. Darsono, M. M. Ibrahim, Performance analysis on stereo matching

6. algorithms based on local and global methods for 3D images application, // Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering, 2018. vol 10. № 2. 23-28.

7. http://project1054516.tilda.ws/.

8. К.И. Кий, Метод для выделения сигнальных зон автомобилей в сложном потоке и для распознавания и отсеивания похожих объектов, //Труды 34ой международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника 2023», 2023. с.216-222.

9. Kiy, K. I., Anokhin, D. A., A new technique for object detection and tracking and its application to analysis of road scene, Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLIV-2/W1-2021, p.119–124.

Информация об авторе

Кий Константин Иванович, к.ф.-м.н., с.н.с., Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт прикладной математики им. Келдыша Российской Академии Наук (ИПМ РАН), Россия, 125047, Москва, Миусская пл., д. 4, konst.i.kiy@gmail.com, ORCID: 0000-0002-0920-921X

Возможности применения игрового имитационного моделирования для обучения нейронных сетей

В.Е. Иванов✉, Н.Г. Яковенко
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова» (БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова), Санкт-Петербург, Россия, cosmoknight@yandex.ru, ivanov_ve@voenmeh.ru

Аннотация
В статье рассматривается вопрос возможности применения игрового имитационного моделирования для обучения нейронных сетей систем управления разного назначения и уровня сложности. В качестве примеров применение приводится опыт последних нескольких лет и проводится краткий обзор наиболее примечательных исследований по данной теме. Рассматриваются вопросы применение игровых средств разработки для систем управления, обучение нейронных сетей для задач классификации изображений и обучение нейронных сетей реальных систем управления с помощью игрового имитационного моделирования и приводятся результаты применения метода для указанных систем. В заключении предлагаются потенциальные направления научных исследований по данной теме.

Ключевые слова
Нейронные сети, машинное обучение, обучение с подкреплением, робототехника, системы управления, имитационное моделирование, игровые средства разработки, трансферное обучение, испытаний нейронных сетей, автоматизация формирования обучающих множеств.

The possibilities of using game simulation modeling to train neural networks

Vladimir E. Ivanov✉, Nikolay G. Yakovenko
The Baltic State Technical University «VOENMEH» named after D.F. Ustinov (BSTU «VOENMEH» named after D.F. Ustinov), St. Petersburg, Russia, cosmoknight@yandex.ru, ivanov_ve@voenmeh.ru

Abstract
The article discusses the possibility of using game simulation modeling to train neural networks of control systems of various purposes and complexity levels. The experience of the last few years is given as examples of application and a brief overview of the most notable studies on this topic is provided. The issues of using game development tools for control systems, training neural networks for image classification tasks and training neural networks of real control systems using game simulation modeling are considered, and the results of applying the method for these systems are presented. In conclusion, potential areas of scientific research on this topic are proposed.

Key words
Neural networks of control systems, machine learning, reinforcement learning, robotics, control systems, simulation modeling, game development tools, transfer learning, testing of neural networks, automation of the formation of data sets.

Постановка проблемы

Машинное обучение стало важной областью исследований во многих сферах деятельности человека и для разнообразных прикладных задач. Преобладающее в традиционных методах машинного обучения предположение о том, что обучающие и тестовые данные должны относиться к одной и той же области, является сложной задачей. В реальном мире собрать достаточно обучающих данных для создания высокоэффективных моделей обучения непросто. Иногда данные получить невозможно или их сбор обходится очень дорого или опасен. В этом случае трудно раскрыть потенциал реализации концепции машинного обучения [1].

Классический процесс обучения модели можно представить следующим образом [2]:

1. Сбор данных – процесс формулирования задачи.
2. Обработка данных и подготовка выборки – собранные данные проходят форматирование, очистку, разметку.
3. Формирование особенностей набора данных – обогащение данных, классификация.
4. Конструирование новых признаков – значения данных, которые используются моделью в процессе обучения и для перехода в релиз-кандидат. Устанавливается, какие атрибуты имеют коэффициенты со значениями, определяющими предсказательную силу. На основании данного процесса создается список признаков.

5. Подбор модели обучения – выполняется параллельно. Модель обучения основана на математическом алгоритме, задача – находить последовательности и сходства в данных.
6. Настройка и оптимизация параметров обучения.
7. Обучение и оценка модели с учетом оптимальных параметров – выполняется процесс адаптации, подгонки под имеющиеся данные, на которых осуществляется процесс обучения.
8. Тестирование и валидация – подготавливаются данные тестирования и валидации, запускается обученная модель, проверяется коэффициент ошибки, точности прогнозов.
9. Развертывание – использование обученной модели для решения частной задачи.

Самыми длительными и ресурсозатратными можно назвать этапы сбора данных, их обработки и формирование их особенностей, а также уточнение их существенных признаков. В задачах обучения нейронных сетей компьютерного зрения – это процесс сбора изображений, разметки ключевых объектов и определение их свойств, распределения объектов по классам и подготовка множества для обучения и тестирования. Данный процесс может занимать большую часть времени разработки системы в зависимости от задачи применения нейронной сети компьютерного зрения.

Разработка роботов, обладающих возможностями и ловкостью человека, — очень сложная задача. Также непросто вручную запрограммировать роботов на выполнение конкретных задач. Более того, эти запрограммированные задачи нельзя перенести в другую область или среду; поэтому роботы становятся узкоспециализированными и очень дорогими в эксплуатации и производстве. В последнее время возрос спрос на машинное обучение как потенциальное решение для обучения роботов выполнению сложных задач. Машинное обучение потенциально может позволить роботам получать информацию об окружающей среде с помощью датчиков и принимать экспертные решения, как это делает человек. Однако для обучения роботизированных платформ требуется больше обучающих данных, а сбор необходимого количества данных с помощью физической машины обходится дорого [1]. Часть задач можно воссоздать имитационно с помощью простых математических или статистических моделей, но для большинства задач, где необходимо воссоздание сложных физических моделей, моделей с большим количеством переменных или со случайными возмущениями, задача для обычного имитационного моделирования становиться проблематичной. А также создание условий, в которых необходимо проводить обучение и испытание таких систем, является проблематичным или опасным, а для некоторых систем они физически недоступны или очень нерентабельны.

Для решения данной проблемы можно использовать метод, основанный на воссоздании имитационной модели процесса в виртуальной игровой среде, созданной с помощью игровых средств разработки. Например, с помощью такой среды можно моделировать физику реального мира и выполнять дорогостоящие симуляции для сбора необходимых обучающих данных. Хотя такая среда не может точно моделировать реальный мир, для решения поставленных задач можно запускать несколько параллельных симуляций, чтобы уменьшить погрешность. Беспилотные автомобили и робототехника могут получить преимущества, используя симуляции для повышения точности и производительности. Google, Waymo и Metamoto разработали собственные среды для симуляции транспортных средств, чтобы имитировать сложные дорожные условия и сценарии с участием пешеходов и других транспортных средств для обучения своих моделей. Такое имитационное обучение можно применять при обучении роботов, когда манипулировать ими очень дорого и часто занимает много времени. Случайные сценарии генерируются и обучаются параллельно в разных сценах симуляции.

В качестве основного метода обучения нейронных сетей систем управления в средах имитационного моделирования используется метод «обучения с подкреплением». Он заключается d использовании двух основных составляющих – «агента» и «окружения».

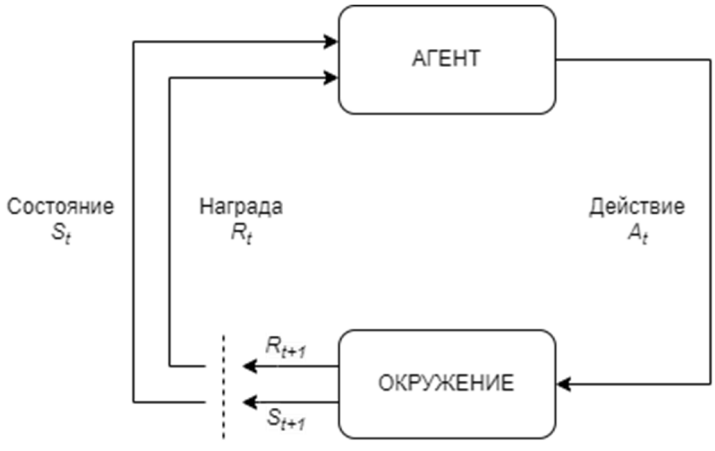


Рисунок 1 — Схема метода обучения с подкреплением

Основные определения метода:

1. *агент* (agent) – алгоритм обучения с подкреплением;
2. *окружение* (environment) – среда или объект, на который воздействует *агент*;
3. *действие* (action: *A*) – команды, которые *агент* может сообщить *окружению*;
4. *состояние* (state: *S*) – значения *окружения*, которые сообщаются *агенту*;
5. *награда* (reward: *R*) – мгновенная оценка *окружением*, возвращаемая *агенту*, как оценка последнего *действия*;
6. *политика* (policy: π/P) – стратегия или «правила поведения», которые *агент* применяется для определения следующего *действия* на основании текущего *состояния окружения*.

Процесс обучения начинается с того, что *окружение* передаёт свои начальные значения *состояния агенту*, который на основании своих значений предпринимает *действие* в ответ на это *состояние*, после чего *окружение* сообщает следующие значения *состояния* и значение *награды* за результаты, совершённые в процессе *действия*. На основании *награды агент* может внести изменения в значения своей *политики* и цикл продолжится.

Применение игровых средств разработки для систем управления

Примером использования для системы управления можно рассмотреть статью [3]. В своей работе авторы разработали программу, которая позволила обучить нейронную сеть управлять объектом для прохождения фарватера, обходя препятствия и избегая столкновений. Для обучения нейронной сети системы управления была создана виртуальная сцена с помощью средства разработки «Unity», в качестве объекта управления использовалась виртуальная модель лодки, которая перемещалась в акватории со сложным рельефом.

Другим примером использования для решения аналогичных задач рассмотрим материалы из [4]. Целью исследования являлась повышение эффективности работы нейросетевой модели при навигации мобильной робототехнической платформы в статически и динамически сгенерированных средах, метод включал настройку и оптимизацию гиперпараметров нейронной сети, корректировку системы вознаграждений и введение нормализации входных векторов. Результаты применения игрового имитационного моделирования показали сокращение времени обучения на 30% за счёт использования параллельного обучения роботов и, как следствие, увеличения опыта в результате исследования окружающей среды, и повышение эффективности навигации на 10% и 22% в динамической и статической средах соответственно.

В статье [5] рассматривается возможность применения игрового имитационного моделирования для комплексной отработки робототехнических комплексов с системой управления, использующую нейронную сеть. Авторы созданием виртуального полигона, на рисунке 2, достигли результатов, которые позволяют: сократить этап натурный испытаний и его затраты, обучить модель системы управления для робототехнического комплекса, эффективно прогнозировать ресурсоемкость моделирования и моделировать реальные условия эксплуатации робототехнических комплексов. В рамках работы автора также смогли разработать методы и алгоритмы формирования виртуальной физической среды для имитационного моделирования, обучения и интеграции нейронной сети системы управления для робототехнических комплексов.

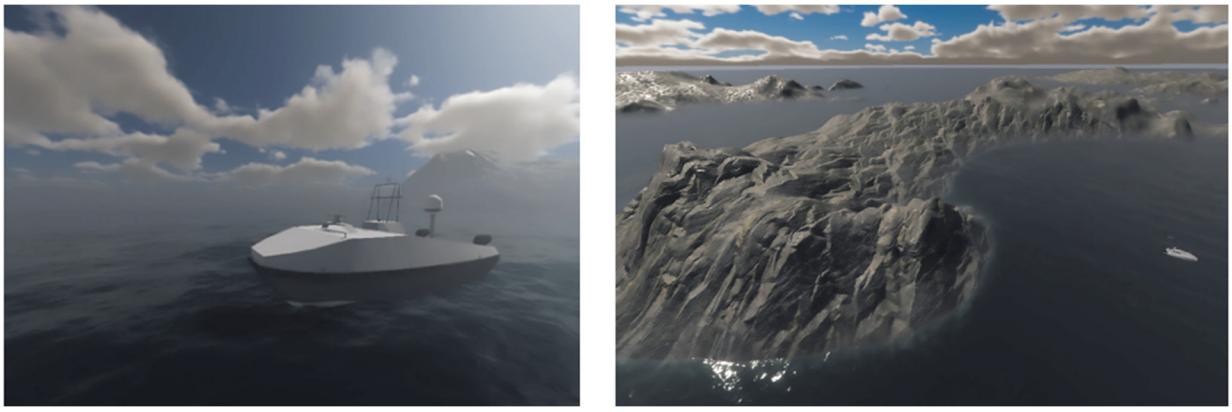


Рисунок 2 — Виртуальный полигон для отработки робототехнических комплексов

Обучение нейронных сетей для задач классификации изображений

В материалах исследования [6] раскрывается вопрос применения подхода к быстрому созданию карт семантических меток с точностью до пикселей для изображений, извлечённых из современных компьютерных игр, для использования в качестве системы классификации изображений. За основу берётся гипотеза о том, что связи между фрагментами изображений можно восстановить по взаимодействию между игрой и графическим оборудованием. Это позволяет быстро распространять семантические метки внутри и между изображениями, синтезированными игрой, без доступа к исходному коду или контенту, создавая плотные семантические аннотации (рис. 3) на уровне пикселей для 25 тысяч изображений, синтезированных фотореалистичной

компьютерной игрой с открытым миром. Эксперименты на наборах данных для семантической сегментации показывают, что использование полученных данных для дополнения изображений из реального мира значительно повышает точность и что полученные данные позволяют сократить количество размеченных вручную данных из реального мира: модели, обученные на игровых данных и модели, обученные на наборе данных из игры и CamVid в соотношении 1 к 3, превосходят модели, обученные на полном наборе данных CamVid.

Рисунок 3 — Пример разметки изображения: слева - оригинальное изображения; справа - изображение, покрытое симантическими картами; снизу увеличенные в масштабе фрагменты изображения

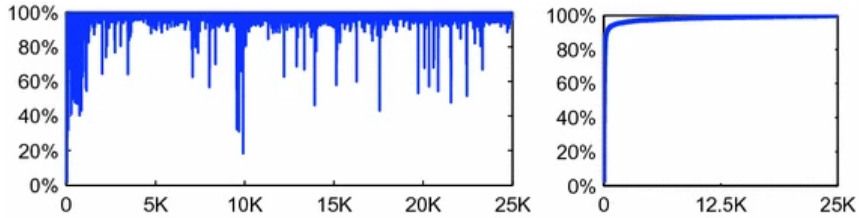


Рисунок 4 — Уровень заполненности изображений метками: слева - до аннотирования; справа - после аннотирования и сортировки.

При создании автоматически размеченного обучающего множества всего 1,3% изображений были размечены меньше чем на 90% (рис. 4), а разработанное программное решение позволяет сократить время ручной разметки до десятка секунд, что сокращает время подготовки обучающего множества для обучения нейронной сети и снизить затраты. В сравнение другими методами, указанными в таблице 1, метод, используемый авторами, превосходит результаты остальных методов. Авторы подмечают, что данный метод можно использовать не только для получения набора кадров, а для создания непрерывных видеопотоков данных, увеличения количества данных для каждого варианта сцены съёмки и сегментации вариантов экземпляров с разными свойствами.

Таблица 1—Сравнение с другими работами на наборе данных CamVid

Метод	Здание	Дерево	Небо	Авто	Дорога	Pedestrian	Забор	Столб	Тротуар	Mean IoU
SuperParsing	70,4	54,8	83,5	43,3	83,4	11,6	18,3	5,2	57,4	42,03
Liu and He	66,8	66,6	90,1	62,9	85,8	28	17,8	8,3	63,5	47,2
Tripathi et al	74,2	67,9	91	66,5	90,7	26,2	28,5	16,3	71,9	53,18
Yu and Koltun	82,6	76,2	89,9	84,0	92,2	56,3	35,8	23,4	75,3	65,3
Kundu et al.	84	77,2	91,3	85,6	92,5	59,1	37,6	16,9	76,0	66,1
Авторов	84,4	77,5	91,1	84,9	94,5	59	44,9	29,5	82	68,9

В материалах статьи [7] рассматривается проблема обучения детектора Виолы — Джонса для 3D-объектов на примере надувного спасательного плота PSN-10. Детектор обучается на полностью синтетическом наборе обучающих данных. В статье подробно рассматриваются методы моделирования надувного спасательного плота, водной поверхности, различных погодных условий, показано на рисунке 5. В качестве пространства признаков используются краевые признаки Хаара, которые позволяют обучить детектор, устойчивый к различным условиям освещения. Для повышения эффективности вычислений для вычисления величины градиента изображения используется норма L1. Эффективность обученного детектора оценивается на реальных данных, полученных во время спасательной операции траулера «Дальний Восток» продемонстрированы в таблице 2. Предложенный метод обучения детекторов Виолы — Джонса может успешно использоваться в качестве компонента аппаратных и программных «помощников» БПЛА.

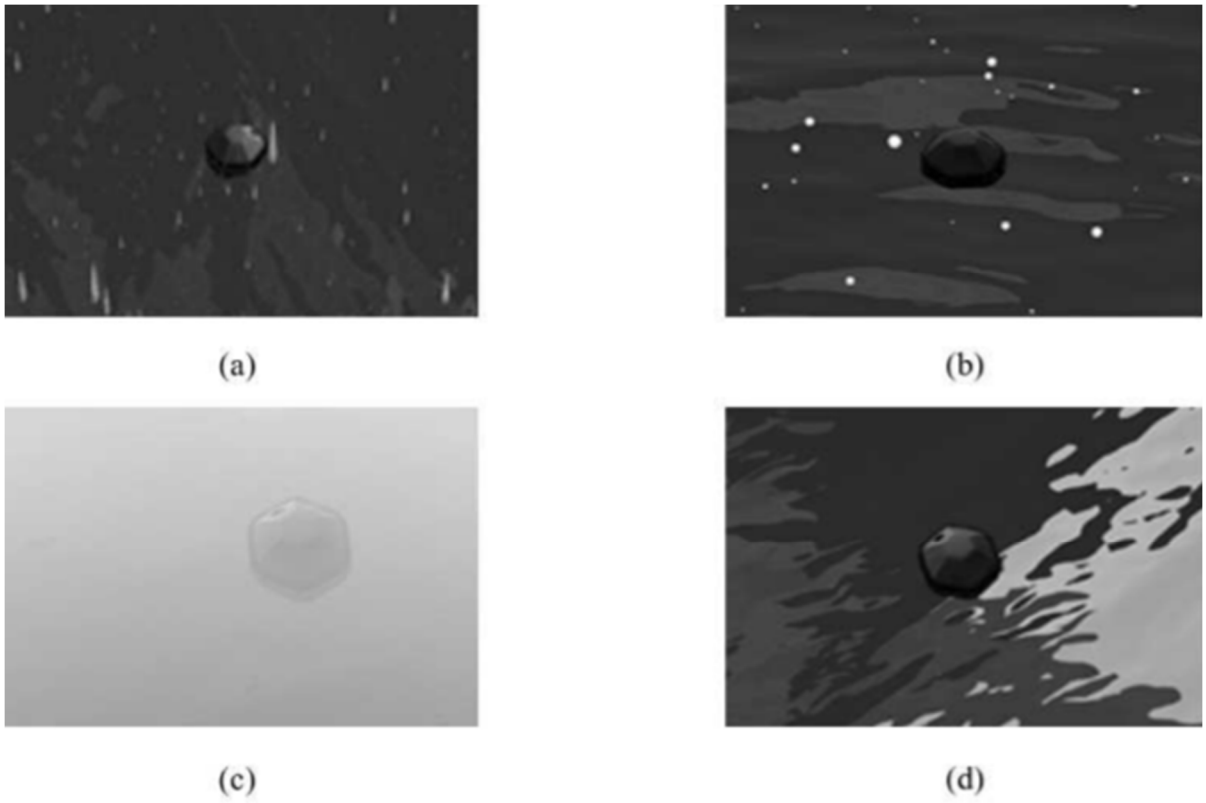


Рисунок 5 — Различные моделируемые погодные явления: a) дождь; b) снег; c)туман; d) ветренная погода

Таблица 2 — Сравнение результатов использования нейронной сети на разных данных

Данные	Истинные	Неправильные истинные	Неправильно ложные	Чёткость (precision)	Чувствительность (recall)	Правильность (F-score)
Синтетические	2374	69	29	0,97176	0,98793	0,97978
Реальные	143	48	18	0,74869	0,88820	0,81250

Обучение нейронных сетей систем управления для прикладных задач

В результатах исследования, представленных в материалах статьи [8], демонстрируется и оценивается метод переноса системы управления вождениям по полосе, основанной на использовании компьютерного зрении из имитационного моделирования в реальный мир без использования меток. Подход использует результаты в области преобразования «image-to-image» для переноса данных из одной среды в другую при совместном обучении нейронной сети системы управления с помощью одной камеры на основе меток управления при моделировании. Авторы оценивают эффективность этого метода при управлении автономным транспортным средством на сельских и городских дорогах. Для эксперимента была создана симуляция в виртуальной среде, имитирующая различные дорожные условия, включая улицы сёл и города, представлено на рисунке 6 и 7, а также сложные транспортные ситуации, такие как повороты и перекрёстки.

Рисунок 6 — Изображение сельской местности, используемой для обучения. Слева-направо, сверху-вниз: реальная местность видом сверху; процедурно-генерируемая дорога в симуляции; реальная дорога от первого лица; дорога в симуляции

Рисунок 7 — Изображение городской местности, используемой для обучения. Слева-направо: дорога в симуляции; вид от первого лица при управлении беспилотным автомобилем; пример реальной дороги, используемой при тестировании

Авторы применили алгоритмы глубинного обучения, которые использовали нейронные сети для обработки изображений и данных сенсоров, таких как лазерные дальномеры и камеры. Обучение происходило на основе «самостоятельного» взаимодействия с окружающей средой, где «агент» – система управления училась принимать решения на основе своих действий и последствий. Агент получал «вознаграждения» за успешное выполнение задач (например, безопасное движение, предотвращение столкновений, соблюдение дорожных знаков) и штрафы за ошибки (например, выезд за пределы дороги, столкновения). Эффективность обучения оценивалась по нескольким критериям, таким как скорость достижения заданных целей, количество успешных маневров и общий уровень безопасности. Результаты показали, что их система, обученная с использованием только симуляционных данных, смогла успешно выполнять задачи, приближенные к реальным условиям вождения. Авторы также провели сравнение с традиционными методами, использующими реальные размеченные данные, и продемонстрировали, представлено в таблице 3, что их подход был сопоставим по эффективности и, в некоторых случаях, даже превосходил существующие решения.

Таблица 3 —Сравнение методов при использовании в разных условиях

Метод	Движение по дороге				Движение по городу
	Моделирование		Реальность		Среднее дистанция между вмешательство в управление (метры)
	Ср. ошибка	Ср. кв. ошибка	Ср. ошибка	Ср. кв. ошибка	
Ручное вождение	0,043	0,087	0,019	0,093	23
Simple Transfer	0,05	0,055	0,265	0,272	9

Метод	Движение по дороге				Движение по городу
	Моделирование		Реальность		Среднее дистанция между вмешательство в управление (метры)
	Ср. ошибка	Ср. кв. ошибка	Ср. ошибка	Ср. кв. ошибка	
Real-to-Sim Translation	-	-	0,261	0,234	10
Sim-to-Real Translation	-	-	0,059	0,045	28
Latent Feature ADA	0,040	0,047	0,032	0,071	15
Авторов	0,017	0,018	0,081	0,087	Ни одного вмешательства на протяжении 3 км.

В дальнейшее результаты авторов данного исследования послужили для развития стартапа, который в данный момент представляет компанию «Wayve» с суммарным объёмом инвестиций около 1,3 миллиардов долларов США.

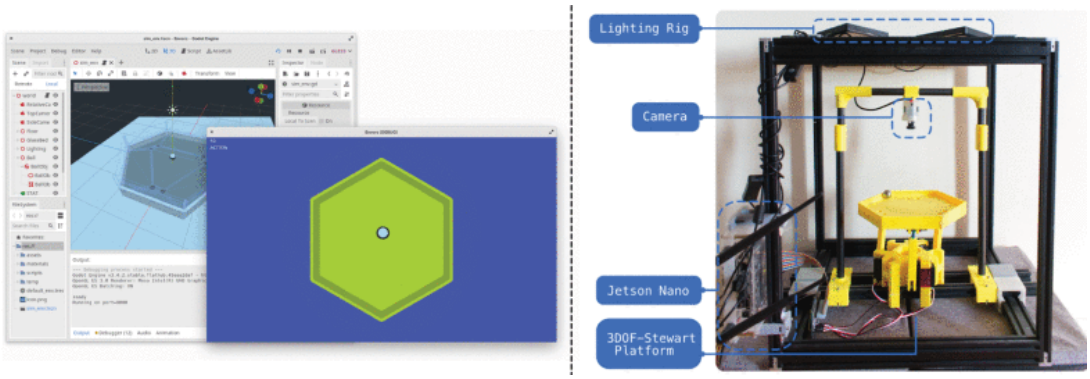


Рисунок 8 — Слева – среда разработки и обзор виртуальной камеры; справа – испытательный стенд

В другой статьей [9] демонстрируют метод трансферного обучения нейронной сети для системы управления роботизированной платформой. В качестве цели исследования было сравнение методов обучения (Q-обучения и «актёр-критик») нейронной сети для задачи стабилизации управляемой платформой на рисунке 8. Для обучения была создана виртуальная среда с камерой на основании настроек реального стенда. Для обучения нейронной сети камеры для определения позиции использовались только синтетические данные, которые представляли из себя множество изображений сцены с разными цветами объектов и фонов, уровнем освещённости, положение источника света, положением камеры и её углом обзора. Для метода Q-обучения камера сообщала текущие положение шарика, на основании которого выдавалась оценка действиям системы, а для «актёр-критик» – передавались значения скорости и ускорения шара на основании данных, полученных с камеры. Результаты для обоих методов представлены в таблицах 4 и 5 соответственно.

Таблица 4 — Результаты оценки эффективности метода Q-обучения

Q-обучение	Моделирование		Реальность	
Конфигурация	Процент успешных попыток (20 попыток)	Размер максимальной награды	Процент успешных попыток (20 попыток)	Размер максимальной награды
Без случайного положения	50,85%	2314	18,98	434
По положению шара	85,56%	6293	55,89%	2783
По положению с камеры	55,98%	2804	34,34%	964
По положению шара и с камеры	88,45%	5663	72,57%	6024
Со случайным положением	86,67%	6544	65,68%	4538
Со случайным положением и шумом	89,55%	7944	78,56%	6027

Таблица 5 — Результаты оценки эффективности метода «актёр-критик»

«Актёр-критик»	Моделирование		Реальность	
Конфигурация	**Процент успешных попыток (20 попыток)**	**Размер максимальной награды**	**Процент успешных попыток (20 попыток)**	**Размер максимальной награды**
По положению шара	92,87%	9370	76.90%	5811
Без шума	88,44%	5825	72.67%	6167
С шумом	99,49%	9942	81.88%	8726

Имитационное моделирование с применением виртуальной игровой среды позволило создать обучающее множество для обучения нейронной сети камеры и обучить нейронную сеть системы управления разными методами в разных условиях, а также определить ключевые факторы, влияющие на уровень обученности (в проценте успешных попыток) нейронной сети как критерий оценки эффективности.

Авторы Jason Ma, William Liang и др. в статье [10] продемонстрировали подход обучения нейронной сети системы управления используя в качестве эксперта языковую нейронную сеть, основанную на ядре GPT-4 и способную сформировать целевую функцию и правила обучения, создать условия, влияющие на получение наград и случайные положения для обучения. После обучения систему, обученную «DrEureka», можно интегрировать в реальную. В задаче обучения было предложено несколько систем управления к обучению: перемещение робособаки на упругом шаре, перемещение куба на пальцах манипулятора-руки, движение робособаки вперёд в разных условиях (рис. 9). Почти во всех случаях настройки для метода обучения, сформулированные лингвистической нейронной сетью, были лучше тех, которые были предложены людьми.

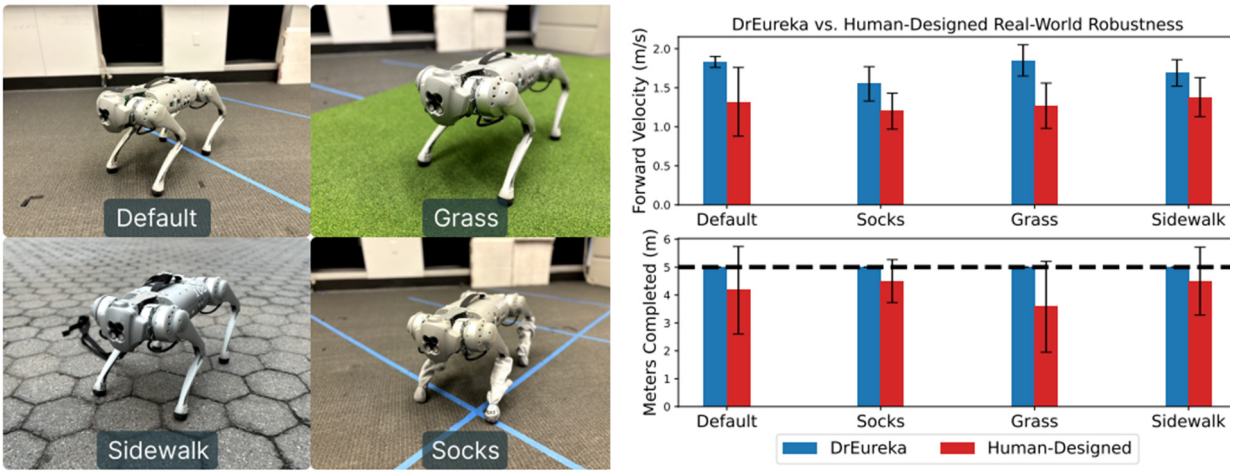


Рисунок 9 — Слева примеры условий использования системы управления робособаки (слева-направо, сверху-вниз: обычное состояние, покрытие из травы, движение по тротуару, движение в носках); справа – результаты пройденной дистанции в зависимости от автора обучения – DrEureka (синее) и разработанное человеком (красное)

По результатам испытания, в таблице 6, движения на шаре лучшие значения были получены для методов обучения при использовании DrEureka с предварительно настроенными гиперпараметрами людьми для разных конфигураций в реальном мире.

Таблица 6.

Методы обучения	**Максимальная скорость (м/с)**	**Максимальное расстояние (метры)**
Разработанное человеком	1,32 ± 0,44	4,17 ± 1,57
Eureka	0,0 ± 0,0	0,0 ± 0,0
Авторов (лучший)	1,83 ± 0,07	5,00 ± 0,00
Авторов (средний)	1,66 ± 0,25	4,64 ± 0,78
Вариации методов авторов		
Без случайных условий	1,21 ± 0,39	4,17 ± 1,04
Разработанное человек	1,35 ± 0,16	4,83 ± 0,29
Влияние на вознаграждение	1,43 ± 0,45	4,33 ± 0,58

Методы обучения	**Максимальная скорость (м/с)**	**Максимальное расстояние (метры)**
Влияние только на физические условия без вознаграждения	0,09 ± 0,36	0,31 ± 1,25
Влияние на диапазон вознаграждения	0,08 ± 0,33	0,28 ± 1,13
Случайное влияние на диапазоны	0,98 ± 0,45	2,81 ± 1,80
Базовые случайные условия		
Метод пересечения энтропии (Cross Entropy Method (CEM))	0,0 ± 0,0	0,0 ± 0,0
Случайный метод пересечения энтропии (CEM Random)	1,46 ± 0,12	5,00 ± 0,00
Оптимизация Байеса для CEM	1,28 ± 0,62	4,00 ± 1,73

Авторы утверждают, что представили новую технологию использования языковых моделей для обучения нейронных сетей систем управления, а именно пригодно использовать для создания функций вознаграждения и конфигурации случайных условий обучения. Авторы считают, что данное применение языковых моделей демонстрирует потенциал, но практическое использование такой системы пока на низком уровне, так как необходимо решить несколько проблем: отсутствует обратная связь по визуальным данным, изменение значений в случайные условия на основе реальных данных и применение модели для применения системного подхода отбора правил для виртуальных кандидатов в реальные условия.

Стоит добавить, что применение языковых нейронных сетей для разработки процесс обучения нейронной сети системы управления является не настолько нетривиальной, так как применение нейронных лингвистических помощников является обыденным опытом в процессе обучения людей или решения задачи разработки программных решений, но исключительно в качестве средства поиска конкретного решения, а не формирование облика системы.

Заключение

На основании рассмотренных примеров можно сделать заключение, что использование игровых средств разработки и игрового имитационного для обучения моделей является актуальной темой исследований, за последние несколько лет появилось больше инструментов для решения задач обучения нейронных сетей систем управления.

Данная тематика представляет широкое поля для дальнейших научных исследований. Потенциальными задачами можно рассматривать методики применения обучения нейронной сети для эксплуатации большой группы разного назначения в одном процессе, методика решения проблем связи переносимой модели для задач повышенной сложности и работы в «необученных» условиях, решение задачи применения лингвистических нейронный сетей для формирования алгоритма разработки системы управления и его улучшения в процессе обучения нейронной сети системы управления, создание методики и разработка программного обеспечения автоматизированного процесса обучения нейронный сетей для задач классификации.

Литература

1. Ranaweera M, Mahmoud Q.H. Virtual to Real-World Transfer Learning: A Systematic Review. Electronics. 2021; 10(12):1491. https://doi.org/10.3390/electronics10121491.

2. Архитектура частично автономной системы создания моделей машинного обучения для разработки искусственного интеллекта / М. И. Астахов, В. А. Гончаров, А. В. Скорпион [и др.] // Пилотируемые полеты в космос. – 2024. – № 3(52). – С. 35-47.

3. Радионов, С. В. Реализация в Unity нейронных сетей для обучения объектов прохождению фарватера / С. В. Радионов, Р. И. Баженов // Постулат. – 2018. – № 8(34). – С. 28.

4. Дударенко Д. М., Смирнов П. А. Настройка гиперпараметров искусственной нейронной сети для навигации мобильной платформы // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019; 23(6): 115-132. https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-6-115-132.

5. Формирование виртуальной физической среды в режиме реального времени для отладки решений и обучения систем управления робототехнических комплексов / А.И. Медведкин, М.И. Астахов, И.С. Бунар, А.С. Островский [и др.] // Труды 34-й Международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника», 23–24 ноября 2023. – Санкт-Петербург. – 512 с.

6. Richter, S.R., Vineet, V., Roth, S., Koltun, V. (2016). Playing for Data: Ground Truth from Computer Games. In: Leibe, B., Matas, J., Sebe, N., Welling, M. (eds) Computer Vision – ECCV 2016. ECCV 2016. Lecture Notes in Computer Science(), vol 9906. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-46475-6_7.

7. Usilin S.A., Arlazarov V.V., Rokhlin N.S., Rudyka S.A., Matveev S.A., Zatsarinnyy A.A. Training Viola-Jones detectors for 3D objects based on fully synthetic data for use in rescue missions with UAV // Вестник ЮУрГУ. Серия: Математическое моделирование и программирование. 2020. №4. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/training-viola-jones-detectors-for-3d-objects-based-on-fully-synthetic-data-for-use-in-rescue-missions-with-uav.

8. A. Bewley et al., «Learning to Drive from Simulation without Real World Labels», 2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Montreal, QC, Canada, 2019, pp. 4818-4824, doi: 10.1109/ICRA.2019.8793668.

9. Ranaweera M, Mahmoud Q.H, "Bridging the Reality Gap Between Virtual and Physical Environments Through Reinforcement Learning," in IEEE Access, vol. 11, pp. 19914-19927, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3249572.

10. Jason Ma, William Liang et al. «DrEureka: Language Model Guided Sim-To-Real Transfer», USA, 2024, doi: 10.48550/arXiv.2406.01967.

Информация об авторах

Иванов Владимир Евгеньевич, аспирант, ассистент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова» (БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова), Россия, 190005, Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, д. 1, cosmoknight@yandex.ru, ivanov_ve@voenmeh.ru

Яковенко Николай Григорьевич, доцент, к.т.н., БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, Россия, 190005, Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, д. 1, iakovenko_ng@voenmeh.ru

Экспериментальная оценка нейронных сетей в единой технологической среде

В.С. Авраменко, Е.С. Чичков
Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования «Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного» Министерства обороны Российской Федерации (Военная академия связи), Санкт-Петербург, Россия, vsavr@yandex.ru, jen.chichckow2014@yandex.ru

Аннотация
Предложен подход к экспериментальной оценке эффективности вариантов реализации различных архитектур нейронных сетей в единой технологической среде, обеспечивающей одинаковые исходные данные и условия для оценивания. Представлены структура и описание работы программного комплекса, показатели эффективности нейронных сетей.

Ключевые слова
Нейронная сеть, программный комплекс, показатель, оценка, эффективность точность, ресурсоемкость, оперативность.

Experimental evaluation of neural networks in a single technological environment

Vladimir S. Avramenko, Evgeniy S. Chichkov,
Federal State-owned Military Educational Institution of Higher Education «Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny» of the Ministry of Defense of the Russian Federation (Military Academy of Communications), St. Petersburg, Russia, vsavr@yandex.ru, jen.chichckow2014@yandex.ru

Abstract
An approach is proposed for experimentally evaluating the effectiveness of different neural network architectures in a single technological environment. The environment provides the same initial data and conditions for testing various neural networks. The structure and description of the software package are presented, as well as the performance indicators of the neural networks.

Key words
Neural network, software package, indicator, evaluation, efficiency, accuracy, resource intensity, performance.

В настоящее время робототехнические комплексы (РТК) активно внедряются в различных сферах деятельности. В частности, с помощью беспилотных летальных аппаратов (БПЛА) существенно повышается эффективность выполнения таких задач как транспортировка грузов, мониторинг, разведка, поиск объектов и многое другое. Сложившаяся в настоящее время ситуация, особенно в военной сфере, требует создания новых РТК или модернизации существующих в кратчайшие сроки. При этом РТК должен выполнять заданные требования к показателям качества и эффективности.

Для оценки качества систем используются критерии пригодности, оптимальности или превосходства. Традиционно в качестве показателей качества используют показатели существенных общесистемных и структурных свойств системы, а функциональные (поведенческие) показатели, характеризующие процесс функционирования системы, используются для формирования показателей эффективности процесса – комплексного операционного свойства (качества) процесса функционирования системы, характеризующего степень его приспособленности к достижению цели операции. Соответственно, под эффективностью РТК понимается комплексное операционное свойство (качество) процесса функционирования РТК, характеризующего степень его приспособленности к достижению поставленной цели.

Эффективность современных РТК во многом определяется их математическим и программным обеспечением. Оптимизация алгоритмов и программного кода обеспечивают возможность использования вычислительных устройств меньшей производительности, памяти меньшего объема и источников энергии меньшей мощности, что, соответственно, снижает стоимость производства и эксплуатации РТК.

В современных РТК все более широко используются технологии машинного обучения, в том числе и нейронные сети (НС), реализуемые не только на программном, но и на аппаратном уровне. Разработка и производство различного рода систем на основе НС является приоритетным направлением развития в ведущих странах.

Следует отметить, что перспективным направлением сокращения времени разработки новых РТК или модернизации существующих является создание модульной платформы, на основе которой осуществляется опе-

ративное проектирование и сборка конечного продукта из готовых технических и программных решений (модулей), в том числе обученных нейронных сетей. Одной из задач реализации модульного подхода к разработке РТК является определение оптимального варианта построения аппаратной и программной компоненты, в том числе и решений на основе нейронных сетей.

Эффективность различных вариантов реализации нейронных сетей необходимо оценивать на всех этапах их создания. Однако в настоящее время еще не до конца сформировался общепринятый подход к оценке НС [1]. Поэтому зачастую разработчикам приходится проводить оценивание по самостоятельно выбранным или разработанным методикам [2]. Но использование разных подходов к оцениванию, показателей, критериев и методик усложняет задачу сравнительного анализа различных архитектур НС.

Вышеуказанные факторы в первую очередь негативно влияют на точность оценивания, что может привести к неправильным решениям по программно-аппаратной архитектуре СИИ. Также в настоящее время актуальна проблема оперативности оценивания, обусловленная, в частности, необходимостью разработки СИИ специального назначения в короткие сроки.

В общем случае задачу создания (выбора) аппаратного и программного обеспечения для РТК можно сформулировать, как разработка (подбор) аппаратных и программных средств, обеспечивающих выполнение требований к показателям результативности, оперативности и ресурсоемкости. Графическое представление задачи на создание РТК в самом общем и упрощенном виде иллюстрирует рисунок 1.

Рисунок 1 — Графическое представление первого варианта постановки задачи на создание РТК

На рисунке 1 положение окружностей 2 и 3 определяет спектр функциональных возможностей, которые предоставляет программное и аппаратное обеспечение. Например, площадь окружности 3 может характеризовать вычислительную мощность аппаратной компоненты, а площадь окружности 2 - количество параметров сети для программной компоненты. Разработчики должны так проектировать программное и аппаратное обеспечение, чтобы характеризующие их окружности стремились по площади и положению к окружности, описывающей поставленную задачу (площадь пересечения всех окружностей должна максимально возможной, в идеальном случае площади всех окружностей равны).

В зависимости от исходных данных и реализуемых СИИ функций возможно несколько типовых вариантов постановок задач на создание (выбор) средств программного и аппаратного обеспечения СИИ на основе методов машинного обучения, в том числе и на основе НС.

Первый вариант постановки задачи возникает в случае необходимости разработки СИИ «с нуля», то есть когда целью является разработка (выбор) математического, программного и аппаратного обеспечения СИИ при заданных требованиях по точности, оперативности и ресурсоемкости. В данной ситуации разработчик имеет возможность определить максимально приближенное к оптимальному программное и аппаратное обеспечение.

Второй вариант формулируется как задача разработки (выбора) математического и программного обеспечения для заданных или уже имеющихся в составе системы аппаратных средств. Решением задачи является программная реализация разработанной или выбранной нейросети. В данном случае постановка задачи на поиск оптимального варианта архитектуры нейросети следующая [1]: пусть θ – множество всех возможных архитектур, заданное исследователем; λ – функция оценки вычислительной сложности архитектуры нейронной сети; γ – верхняя граница вычислительной сложности архитектуры; μ – функция оценки качества работы архитектуры на решаемой задаче. Тогда задача поиска архитектуры α может быть сформулирована следующим образом:

$$\alpha = \max(\,\mu(\alpha i)\,) \mid \lambda(\alpha i) \leq \gamma \;\forall \alpha i \;\in \theta$$

Верхнюю границу вычислительной сложности задает аппаратная часть. Она определяет максимальную вычислительную мощность, ресурсоемкость и общую производительность всей системы. Также необходимо, чтобы СИИ производила вычисления и формировала конечный результат в требуемые сроки. Тогда появляется потребность в измерении этого времени на целевом устройстве с учетом всех особенностей реализации именно на данном аппаратном средстве.

Одним из путей решения проблемы использования нейронных сетей с высокой вычислительной сложностью на вычислительных устройствах с ограниченной производительностью является оптимизация нейросетевых архитектур без значительного снижения точности.

Основные известные методы оптимизации нейронных сетей следующие:

1. Поиск архитектуры нейронной сети (NAS) - позволяет определить оптимальные параметры модели с учетом требований по точности, скорости обучения, ресурсоемкости и другие. NAS использует алгоритмы обучения с подкреплением, эволюционные алгоритмы, генетическое программирование, случайные поисковые методы, методы оптимизации градиентного спуска и др.
2. Прунинг - является одним из первых методов ускорения нейронных сетей. В основе прунинга лежит идея об удалении связей между нейронами, вносящих наименьший вклад в итоговый результат.
3. Дистилляция - это процесс обучения одной нейронной сети (сети-ученика) при помощи другой, заранее обученной сети (сети-учителя). Суть дистилляции заключается в том, что можно создать и обучить относительно «легкую» сеть-ученик, которая будет имитировать поведение «тяжелой» сети-учителя, повторять ее существенные свойства и характеристики, например, параметры распределение весов.
4. Квантование - объединяет методы понижения дискретности весов нейронной сети для более эффективного использования вычислителя. Основная идея квантования заключается в том, что данные преобразуются из представления с плавающей запятой в представление с более низкой точностью, например, с использованием 8-битных целых чисел.
5. Кластеризация весов - заключается в замене исходной матрицы уникальных значений весов на модифицированную матрицу, содержащую индексы значений центроидов и значения центроидов. Кластеризация весов позволяет уменьшить объем памяти и увеличить скорость обработки за счет уменьшения количества чисел с плавающей запятой и (или) количества уникальных значений.

В качестве аппаратных средств для реализации нейронных сетей могут быть использованы уже установленные на БПЛА вычислительные средства, также может производиться оснащение процессорами общего назначения, графическими процессорами или специализированными аппаратными комплексами. Известны разработки, в том числе и отечественные, использующие компактные специализированные процессоры для обработки видеоданных на борту. Но на практике не всегда есть возможность производить дооснащение РТК необходимым оборудование в кратчайшее время. В графической модели разработки (рис. 2) данная ситуация отражается следующим образом: положение окружности аппаратного обеспечения фиксируется и осуществляется изменение только программного обеспечения с целью достижения максимальной степени выполнения задачи за счет нахождения оптимального соотношения параметров программной и аппаратной компоненты.

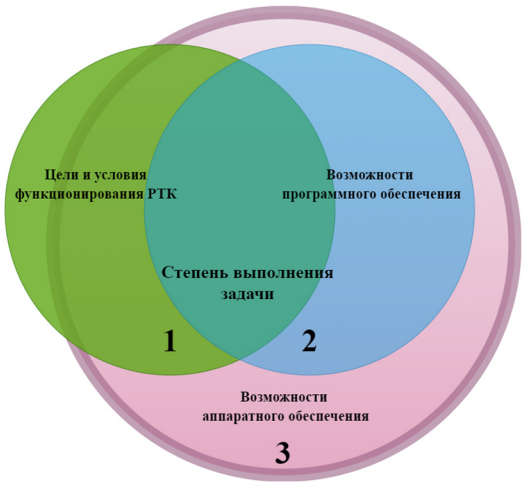


Рисунок 2 — Графическое представление второго варианта постановки задачи на создание РТК

Третий вариант постановки задачи обусловлен необходимостью разработки (выбора) аппаратных средств (процессоров общего назначения, графических карты, нейропроцессоров и т.д.) при заданном (уже имеющемся) математическом обеспечении (заданной структуре и параметрах нейросети) и программном обеспечении. В данном случае разработчика устраивает по тем или иным причинам имеющееся программное обеспечение РТК, но появляется необходимость в выборе аппаратной компоненты, которая сможет наиболее полно реализовать возможности программного обеспечения с минимальной ресурсоемкостью, в том числе и энергопотреблением.

На рисунке 3 изображены две ситуации, отличающееся разными решениями по аппаратной части. Из левой части рисунка видно, что аппаратная компонента явно не подходит для выполнения задачи, так как ее возможности лишь частично соответствуют целям и условиям функционирования РТК. Например, вычислительной мощности аппаратной части (площади круга 3) недостаточно для корректной работы СИИ. На правой же части рисунка наоборот, вычислительная мощность (площадь круга 3) избыточна для выполнения задачи, негативно сказывается на целесообразности и экономической выгоде производства данного РТК.

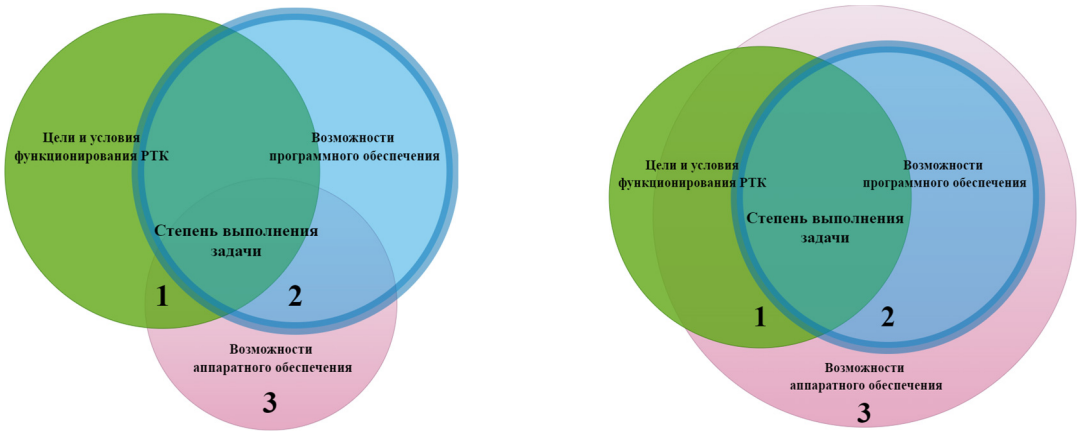


Рисунок 3 — Графическое представление третьей постановки задачи на создание РТК

Оценивание эффективности СИИ, в том числе и на основе нейронных сетей, должно осуществляться на всех этапах создания. Но, резюмируя вышесказанное, в настоящее время сложилась проблемная ситуация, обусловленная несоответствием сложившихся на практике подходов к оцениванию эффективности нейросетей (СИИ на их основе) современным требованиям по точности и оперативности. Особенно остро она проявляется при решении задачи сравнительной оценки эффективности различных реализаций нейросетей для решения конкретной задачи.

Для решения сложившейся задачи предлагается способ экспериментальной оценки эффективности НС, суть которого заключается в использовании для оценивания единой технологической среды на основе программного комплекса [3]. Под единой технологической средой оценивания понимается система показателей эффективности и процедур измерения, расчета и оценивания, одинаковые наборы данных для обучения и тестирования. Исследуемые НС загружаются в виртуальную программную среду. Для измерения характеристик НС на вход исследуемых НС подаются наборы реальных данных. Результаты испытаний фиксируются в базе данных, на их основе в модуле оценки рассчитываются значения показателей эффективности.

Следует отметить, что разработка и оценивание алгоритмов под заданное специализированное устройство (второй вариант постановки задачи) сталкивается с проблемой воспроизводимости аппаратной компоненты. Применение в программном комплексе виртуальных машин и эмуляторов позволяет во многих случаях решить эту проблему.

Структура программного комплекса представлен на рис.4. Основные элементы программного комплекса следующие: виртуальные машины (ВМ) для имитации определенной программно-аппаратной платформы для нейронной сети (НС); генератор датасетов (ДС) – наборов данных, предназначенных для обучения НС; датасеты; набор неразмеченных реальных данных (ДСрд), предназначенных для испытания НС; база данных результатов работы НС (БДрез); программный модуль оценки эффективности (ПМОЭ), предназначенный для расчета значений и оценки частных и обобщенных показателей эффективности НС (*Yрез* – показатель результативности, *Yрес* - показатель ресурсоемкости, *Yоп* – показатель оперативности).

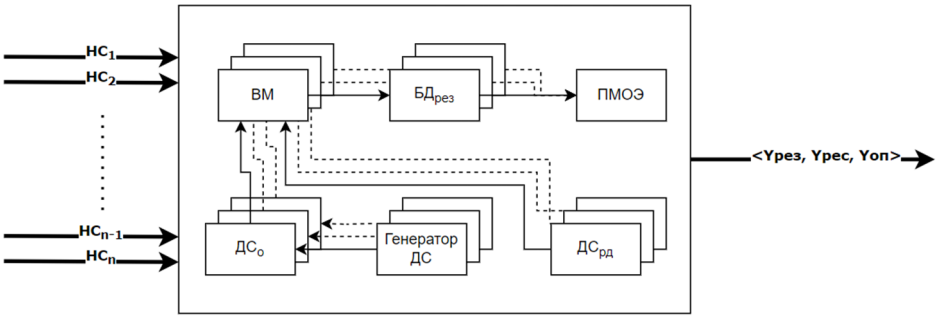


Рисунок 4 — Структура программного комплекса для экспериментальной оценки эффективности нейронных сетей

На вход программного комплекса подаются исследуемые нейронные сети. При необходимости осуществляется генерация датасетов и обучение НС. Далее для измерения характеристик сети, необходимых для расчета значений показателей результативности, ресурсоемкости и оперативности, на вход исследуемых НС подаются наборы реальных и (или) сгенерированных данных. Все результаты испытаний фиксируются в базе данных результатов, на их основе в модуле оценки эффективности рассчитываются значения частных и обобщённых показателей эффективности.

Основные показатели эффективности НС (СИИ на основе НС) приведены в таблице 1.

Таблица 1 — Свойства и показатели эффективности нейронных сетей

Эффективность НС		
Результативность	**Оперативность**	**Ресурсоемкость**
Accuracy («Точность») – доля правильных ответов НС. Loss – точность нейронной сети по показателям отклонения. Precision – доля правильных ответов модели в пределах класса. Recall («Полнота») – доля истинно положительных классификаций.	Время получения результата. Время обучения. Время генерации датасета.	Количество вычислительных операций. Загрузка процессора. Объем занимаемой оперативной памяти. Объем занимаемой постоянной памяти.

Особенно актуальна задача сравнительного анализа эффективности НС при разработке малогабаритных мобильных систем, самостоятельно обрабатывающих данные [4]. В частности, многие беспилотные летательные аппараты (БПЛА) используют компьютерное зрение для обнаружения и распознавания объектов различного рода. Вместе с тем реализация обработки данных на борту БПЛА во многих задачах требует вычислительного устройства достаточно высокой производительности. Для малогабаритных БПЛА эта задача является проблемной, так как ее решение путем использования мощных высокопроизводительных процессоров с соответствующим энергоснабжением влечет за собой увеличение массогабаритных характеристик, при этом для сохранения требуемых полетных характеристик (скорость, высота, продолжительность полета) может потребоваться модернизация или замена двигателей и других конструктивных элементов. Соответственно, возникает необходимость использования в малогабаритных БПЛА компактных вычислителей и соответствующих средств математического, информационного и программного обеспечения, обеспечивающих обработку данных с требуемыми значения показателей результативности и оперативности и минимальными вычислительными затратами, что, в свою очередь, требует оценивания эффективности вариантов решения данной задачи.

Таким образом, применение предлагаемого подхода к оценке эффективности НС, применяемых в РТК, позволит повысить точность и оперативность оценивания эффективности программных и программно-аппаратных реализаций НС различных архитектур за счет автоматизации процесса оценивания, обеспечения одинаковых условий, исходных данных и процедур измерения и оценивания.

Литература

1. Щербин А.С. Проблемы оценки качества архитектур нейронных сетей и алгоритмов поиска архитектур. Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. 2023. Т.21, №2. С. 51-62.

2. Маликов А.В., Авраменко В.С. Оценка достоверности диагностирования компьютерных инцидентов в инфокоммуникационных системах. Труды V межвузовской научно-практической конференции: Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях. 2020. С. 189-193.

3. Авраменко В.С., Чичков Е.С. Программный комплекс для экспериментальной оценки эффективности нейронных сетей // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО-2024). Материалы XIII Международной научно-технической и научно-методической конференции. Санкт-Петербург, 2024. С. 16-19.

4. Остриков О. М., Рюмцев А. А. Новый метод использования принципов модульности в конструкции беспилотных летательных аппаратов. Вестник Брестского государственного технического университета. №4. 2019 С. 59-62.

Информация об авторах

Авраменко Владимир Семёнович, доцент, к.т.н., профессор кафедры, Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования «Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного» Министерства обороны Российской Федерации (Военная академия связи), Россия, 194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий проспект, д. 3, vsavr@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-2452-0380

Чичков Евгений Сергеевич, курсант, Военная академия связи, Россия, 194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий проспект, д. 3, jen.chichckow2014@yandex.ru

Классификация сегментированных областей на основе векторов признаков

В.Д. Матвеев✉, А.Е. Архипов, И.С. Фомин
Государственный научный центр Российской Федерации «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики» (ГНЦ РФ ЦНИИ РТК), Санкт-Петербург, Россия, v.matveev@rtc.ru

Аннотация
В работе проверено предположение о возможности классификации сегментированных областей, полученных на выходе нейронной сети SAM по векторам признаков. Объяснена причина определения принадлежности объектов через них. Показаны точки, из которых собирались вектора признаков. Предложен способ симуляции датасетов мобильной робототехники с помощью видео из интернета. На основе полученных результатов сделан вывод о возможности использования такого подхода для определения класса сегментируемых объектов.

Ключевые слова
Сегментация, вектор признаков, мобильная робототехника, Segment Anything Model.

Благодарности
Результаты получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России №075-00697-24-00 от 27.12.2023 «Исследование методов создания самообучающихся систем видеонаблюдения и видеоаналитики на базе комплексирования технологий пространственно-временной фильтрации видеопотока и нейронных сетей» (FNRG 2022 0015 1021060307687-9-1.2.1).

Extraction of features from modern segmentation networks

Viktor D. Matveev✉, Andrey E. Arkhipov, Ivan S. Fomin
Russian state scientific center for robotics and technical cybernetics, St. Petersburg, Russia, v.matveev@rtc.ru

Abstract
The paper verifies the assumption about the possibility of classifying segmented regions obtained at the output of the SAM neural network by feature vectors. The reason for determining the ownership of objects through them is explained. The points from which the feature vectors were assembled are shown. A method for stimulating mobile robotics datasets using video from the Internet is proposed. Based on the results obtained, it is concluded that such an approach can be used to determine the class of segmented objects.

Key words
Segmentation, feature vector, mobile robotics, Segment Anything Model.

Acknowledgements
The work was carried out as the part of the state task of the Russian Ministry of Education and Science «Research of methods for creating self-learning video surveillance systems and video analytics based on the integration of technologies for spatiotemporal filtering of video stream and neural networks» (FNRG 2022 0015 1021060307687-9-1.2.1 №075-00697-24-00 from 27.12.2023).

Введение

В современных мобильных роботах часто встречается проблема обработки визуальных данных, поскольку передача информации по каналу связи не всегда возможна, а обработка изображений в высоком разрешении на борту робота трудоемка. Приходится подбирать специализированные инструменты для работы с изображениями, чтобы не сильно перегружать вычислительную систему робота. Так, универсальным способом обработки изображений может стать нейронная сеть – например сеть сегментации для определения препятствий на пути мобильного робота.

Однако, некоторые современные сети-сегментаторы не позволяют определять класс объекта, который они выделяют. В таком случае может помочь дополнительно обученный классификатор – однако классификационная сеть дополнительно нагрузит вычислитель робота – и соответственно, не подходит для такой задачи, в отличии от простого линейного классификатора, обладающего малыми размерами.

В целом, в работе рассказано о том, какие подходы к сегментации, совместимые с устройствами на мобильных роботах, сейчас существуют. После этого описан способ сбора набора данных, который был приме-

нен в данной работе. Также рассказано каким образом строились эксперименты и на основе каких предположений выбирались точки в сети для получения информации об изображении. И наконец, показано, каких результатов удалось добиться в своих экспериментах.

Архитектуры сегментаторов для мобильных роботов

У многих современных сегментирующих архитектур существует проблема, которая присуща и многим другим нейросетям – огромные объемы, которые они занимают на устройстве при своей работе. Некоторые модели могут занимать до 30 Гб видеопамяти [1], и работают с низкой скоростью до 0,5 кадров в секунда. В связи с этим, необходимо было провести поиск моделей, которые бы имели достаточную скорость и при этом не занимали всю память устройства.

В ходе поиска было найдено множество сетей, показывающих высокий результат на общеизвестных наборах данных. Однако, наибольшее внимание привлекли работы [2-4]. В работе [2] представлена BiSeNet, которая обрабатывает поступающее изображение с помощью двух веток в своей архитектуре. При этом одна ветка генерирует низкоуровневые признаки (небольшие объекты) – но при этом не сильно уменьшает изображение и требует много вычислений; а вторая ветка в свою очередь генерирует высокоуровневые признаки (общее представление о сцене на изображении) – и делает это быстро, уменьшая изображение до малого размера.

Второй интересный подход представлен в работе [3]. Авторы SegFormer предлагают с помощью трансформеров и механизма внимания [5] обучать для сегментации Visual Transformer (ViT) [6] для кодирования признаков, и простой (всего 4 % от общего объема весов) многослойный персептрон для их декодирования. Эта работа является такой интересной именно потому, что при помощи простого персептрона и ViT кодировщика – который применяется во множестве задача – удалось достичь одних из лучших результатов, на момент выпуска работы. Это показывает, как сильно механизм внимания обходит другие подходы для формирования признаков (в том числе – встреченные в ходе поиска методов).

И наконец, в работе [4] представлена Segment Anything Model (SAM). Отличительная особенность данной модели в том, что она строится на так называемой prompt-based сегментации (prompt англ. – запрос, base англ. – основа; запросоориентированная сегментация) – когда объекты на изображении выделяются согласно некоторой подсказке, например, у данной модели: точка, ограничивающей прямоугольник или маска. Плюсом такого подхода становятся четки границы, отделяющие одни объекты от других, в то время как значительным минусом становится отсутствие классов у сегментированного областей – поскольку сеть стремится выделить запрос, а не какой-либо класс отдельно. Кроме того, конкретно сама модель SAM отлично работает без дополнительного обучения из-за огромного изначального датасета, также представленного в работе [4]. Пример работы без обучения приведен на рисунке 1. Именно поэтому было решено использовать именно эту модель в своих исследованиях.

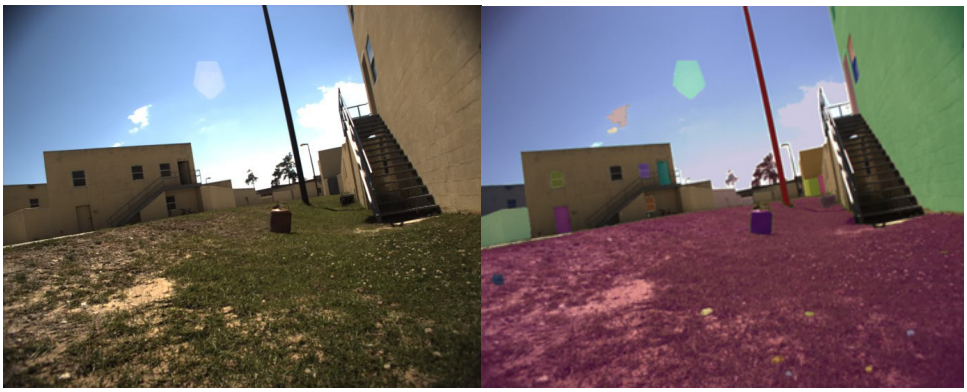


Рисунок 1 — Пример работы SAM. Слева представлено изначальное изображение, справа полученные маски без дополнительного обучения

Набор данных

Однако, как было сказано ранее, у prompt-based подхода есть проблема с отсутствием класса у сегментированных областей. Можно классифицировать уже сегментированные области, как это сделано в работе [7]. Однако, такой подход нагружает вычислитель дополнительной сетью, и если в лабораторных условиях это приемлемо, то на мобильном роботе две сети будут работать вдвое дольше, еще сильнее замедляя обработку изображения. В связи с этим, было принято решение добавить линейный классификатор к SAM, который бы выполнял эту задачу определения принадлежности сегментированной области до полного формирования масок.

При этом появляется вопрос, из какой части архитектуры извлекать информацию об объекте и подсказке к нему. Очевидно, что делать это нужно после объединения признаков подсказок и изображений. На рисунке 2 показана общая архитектура SAM, из которой видно, что необходимо брать признаки из декодера.

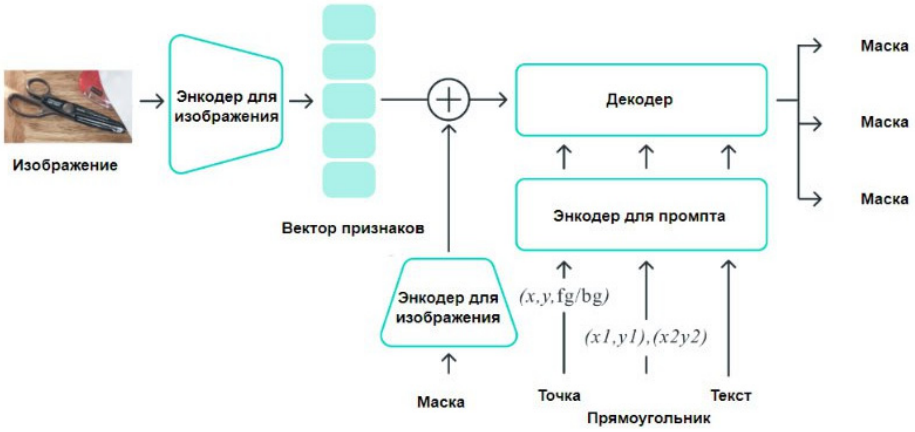


Рисунок 2 — Архитектура SAM

Однако, на выбор остается несколько точек, в которых эти признаки могут быть использованы. На рисунке 3 показаны четыре точки, в которых собирались векторы признаков для обучения линейного классификатора. Все эти точки подходят для классификации, поскольку сама модель училась на текстовых подсказках (предварительно обработанных другой моделью) и должна обладать пониманием о принадлежности вещей к классам. При этом необходимо выделить такую часть в декодере, чтобы слияние признаков картинки и подсказки все еще указывало на конкретную область – а не содержало информацию обо всем изображении.

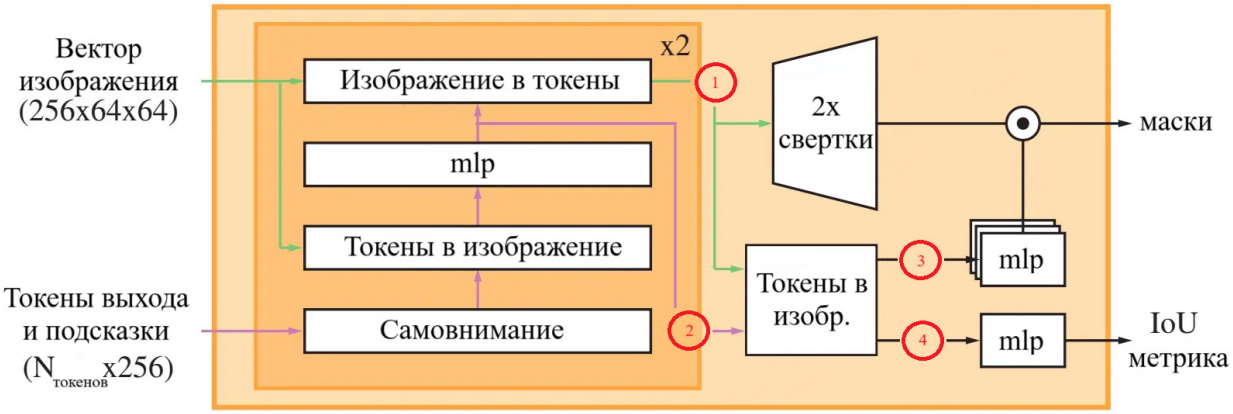


Рисунок 3 — Точки сбора данных для обучения классификатора: 1 – после полного задуманного авторами объединения векторов изображений и токенов; 2 – после однократного объединения векторов и токенов; 3 – после восстановления изображения из токенов полного цикла; 4 – после восстановления изображения из токенов одиночного объединения

После определения мест, с которых будут собираться вектора признаков для определения классов объектов, необходимо собрать изображения, которые будут эти вектора признаков формировать. И здесь возникает еще одна проблема – наборов данных для мобильной робототехники практически нет. Все общепризнанные наборы, вроде ADE20K [8] или CityScapes [9], собраны для обучения нейронных сетей автовождению автомобиля, который большую часть времени двигается по асфальтированным дорогам и видит перед собой дома и другие машины – в отличии от мобильного робота. Действительно подходящих наборов данных для робототехники было найдено всего 2 - RUGD [10] и Rellis-3D [11]. И из-за того, что полноценных наборов так мало, было решено использовать их в качестве тестовых наборов для разрабатываемого алгоритма.

Обучающие примеры было решено набирать из видеороликов в интернете. Конкретнее, из видеороликов, в которых коты с GoPro камерами бегают по пересеченной местности. В пользу такого решения говорит несколько факторов: во-первых, поле зрения камеры с ошейника кота примерно соответствует полю зрения мобильного робота; во-вторых, коты двигаются по таким местам, где не ходит человек – и соответственно не может собрать данные. Минусом такого подхода, как будет показано на рисунке далее, можно назвать постоянно присутствующую морду кота на изображении, однако с этим можно бороться, отрезав верхние 10–20 % изображения, при этом сохранив его смысл.

Таким образом, всего было собрано около 230 изображений, объекты на которых затем были превращены в вектора признаков. Это происходило с помощью задания точечной подсказки на конкретном интересующем объекте. Затем получалась информация об этом самом объекте и о подсказке, которая его формирует. В даль-

нейшем проводилось обучение линейного классификатора для проверки гипотезы о возможности использования векторов состояния для получения знаний об изображении. На рисунке 4 представлены примеры из набора данных, которые отражают его достоинства поля зрения и труднодоступных для человека мест.

Рисунок 4 — Пример ситуаций, в которых может оказаться робот. Слева направо – узкое место, ограниченное со всех сторон; территория с большим количеством камней; коридор

Описание экспериментов

Основной целью данной работы является проверить, возможно ли использовать вектор признаков для определения классов объектов, которые поступают на вход сети. Как уже было сказано выше, для этого было решено использовать линейный классификатор, который обучался на каждой из 4 точек в скрытом пространстве сети. Обучающий набор формировался из изображений с GoPro камер на котах, а тестовый набор был сформирован из RUGD – Rellis-3D наборов – по 25 случайных кадров из каждого набора. Пример тестовых изображений можно увидеть на рисунке 5.

Рисунок 5 — Пример тестовых изображений из наборов данных RUGD и Rellis-3D

Для проверки возможности такого обучения были выбраны следующие, распространенные в робототехнике, классы: дорога (место, где робот может двигаться); препятствие (небольшие препятствия разных форм и размеров); деревья (высокие вертикальные препятствия, сюда попали также столбы и опоры из некоторых кадров RUGD); и фон (в основном, небо, которое не относится ни к чему другому).

Экспериментальные результаты

Результатом экспериментов стала точность классификации тестовых изображений, а точнее, их векторов признаков – метки которых затем предполагается далее использовать для присваивания класса самим областям. Всего было проведено 3 эксперимента для каждой из точек из рисунка 3, среднее значение точности показано в таблице 1.

Таблица 1 — Результат экспериментальных исследований

№ точки	Произошедшее перед ней преобразование	Размерность вектора признаков	Точность, полученная на тестовом наборе, %
1	Полный цикл объединения векторов и подсказок	[4096, 256]	95,0
2	Однократное объединение векторов и подсказок	[7, 256]	87,5
3	Восстановление изображения из токенов полного цикла	[4, 256]	92,5

№ точки	Произошедшее перед ней преобразование	Размерность вектора признаков	Точность, полученная на тестовом наборе, %
4	Восстановление из токенов одиночного объединения	[256]	82,5

Из этой таблицы видно, что результаты подтвердили возможность обучения линейного классификатора на векторах признаков достаточно успешно, чтобы иметь возможность распознавать совершенно новые объекты и использоваться в задачах мобильной робототехники. Наиболее удачный результат был показан в точке 1, после объединения изображений с подсказками по полному циклу, но до проведения каких-либо дополнительных манипуляций с ними.

Заключение

В работе было проверено предположение о возможности использования векторов признаков объектов, извлеченных из современной сегментационной сети SAM для определения класса объектов на изображении, поскольку изначально у SAM нет классификации объектов при их обнаружении, что препятствует использованию этой сети в задачах мобильной робототехники.

Использование векторов признаков возможно с довольно высокой точностью, при этом вектора сразу из нескольких точек превышают 90 % порог точности, что в тех или иных ситуациях позволяет выбирать, какие вектора более предпочтительно использовать.

Дальнейшее направление работы лежит сразу в нескольких областях. Во-первых, необходимо нанести получающиеся классы на изображение с масками и сравнить метрики сегментации с истинной разметкой наборов данных. Во-вторых, необходимо перейти на полноценные кадры роботов, отказавшись от GoPro с ошейников котов в пользу более реалистичной обстановки и требуемых маршрутов. Это можно сделать, собрав новый тестовый набор данных на каких-либо реальных мобильных роботах, а RUGD и Rellis-3D в таком случае выступят обучающими датасетами.

Литература

1. Zheng S. et al. Rethinking semantic segmentation from a sequence-to-sequence perspective with transformers //Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition. – 2021. – С. 6881-6890.
2. Yu C. et al. Bisenet: Bilateral segmentation network for real-time semantic segmentation //Proceedings of the European conference on computer vision (ECCV). – 2018. – С. 325-341.
3. Xie E. et al. SegFormer: Simple and efficient design for semantic segmentation with transformers //Advances in neural information processing systems. – 2021. – Т. 34. – С. 12077-12090.
4. Kirillov A. et al. Segment anything //Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision. – 2023. – С. 4015-4026.
5. Vaswani A. et al. Attention is all you need //Advances in neural information processing systems. – 2017. – Т. 30.
6. Dosovitskiy A. et al. An image is worth 16x16 words: Transformers for image recognition at scale //arXiv preprint arXiv:2010.11929. – 2020.
7. Архипов А. Е., Фомин И. С., Матвеев В. Д. КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ СЕГМЕНТАЦИИ, СОПРОВОЖДЕНИЯ И КЛАССИФИКАЦИИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ВИДЕОАНАЛИТИКИ //Известия ЮФУ. Технические науки. – 2024. – №. 1.
8. Zhou B. et al. Scene parsing through ade20k dataset //Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. – 2017. – С. 633-641.
9. Cordts M. et al. The cityscapes dataset for semantic urban scene understanding //Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. – 2016. – С. 3213-3223.
10. RUGD Dataset // [Электронный ресурс] URL: http://rugd.vision/ (дата обращения 16.07.2024)/
11. Jiang P. et al. Rellis-3d dataset: Data, benchmarks and analysis //2021 IEEE international conference on robotics and automation (ICRA). – IEEE, 2021. – С. 1110-1116.

Информация об авторах

Матвеев Виктор Дмитриевич, инженер, лаборатория «Технологии искусственного интеллекта», Государственный научный центр Российской Федерации «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики» (ГНЦ РФ ЦНИИ РТК), Россия, 194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 21, v.matveev@rtc.ru, ORCID: 0009-0005-7351-6707

Архипов Андрей Евгеньевич, м.н.с., лаборатория «Технологии искусственного интеллекта», ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Россия, 194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 21, a.arkhipov@rtc.ru, ORCID: 0000-0002-5035-3432

Фомин Иван Сергеевич, м.н.с., лаборатория «Технологии искусственного интеллекта», ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Россия, 194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 21, i.fomin@rtc.ru, ORCID: 0000-0001-9066-4836

Экспериментальные исследования применения искусственного интеллекта в системе робот-робот

В.Е. Вавилов✉, А.А. Хусаинова, Б.В. Галицков, О.М. Ахунов,
М.С. Максимов, В.А. Нугаев, Р.Р. Хазиев
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский университет науки и технологий» (ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий»), г. Уфа, Республика Башкортостан, Россия, vavilov.ve@ugatu.su

Аннотация
В статье представлены экспериментальные исследования, описывающие взаимодействие трех роботов-пылесосов под управлением нейронной сети. Детально описываются подходы к реализации эксперимента, приводятся данные компьютерного моделирования и сравниваются с результатами экспериментальных исследований. В исследовательской работе поставлена цель, ответить на вопрос как будут вести себя роботы под управлением искусственного интеллекта, находясь в реальной среде при взаимодействии только между роботами. Исходя из результатов эксперимента и сравнения его с симуляцией делается выводов, в том числе о возможности существования робосферы как искусственной экосистемы роботов, необходимой, к примеру для исследований труднодоступных мест. В результате проведения эксперимента были получены следующие выводы: что роботы под управлением нейронной сети могут взаимодействовать друг с другом, бороться за лидерство, в ряде случаев изощренно, то есть создание искусственной экосистемы роботов является вполне возможным, даже с использованием самых простых технических решений в области робототехники и простых архитектур нейронных сетей; системы энергообеспечения, очевидно, являются одним из самых критических узлов, ограничивающих создание робототехнических комплексов и робосферы. При этом разработчики робототехнических комплексов развивают энергетические системы роботов исходя из внутренних потребностей, и минимально используют среду обитания роботов. Данное наблюдение является одним из аргументов, подтверждающих нашу концепцию робосферы.

Ключевые слова
Автономный робот, робосфера, искусственный интеллект, нейронная сеть.

Благодарности
Проект «Электромеханика 360» осуществляется при поддержке гранта Минобрнауки России в рамках федерального проекта «Популяризация науки и технологий» от 03.05.2024 года № 075-15-2024-492.

Experimental studies of the use of artificial intelligence in the robot-robot system

Vyacheslav E. Vavilov✉, Aigul A. Husainova, Bogdan V. Galitskov, Oleg M. Ahunov,
Maksim S. Maximov, Vladislav A. Nugaev, Ravil R. Khaziev
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa University of Science and Technology» (Ufa University of Science and Technology), Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia, vavilov.ve@ugatu.su

Abstract
The article presents experimental studies describing the interaction of three vacuum cleaner robots controlled by a neural network. The approaches to the implementation of the experiment are described in detail, computer modeling data are presented and compared with the results of experimental studies. The research paper aims to answer the question of how robots under the control of artificial intelligence will behave, being in a real environment with interaction only between robots. Based on the results of the experiment and its comparison with the simulation, conclusions are drawn, including the possibility of the existence of the robosphere as an artificial ecosystem of robots, necessary, for example, for research of hard-to-reach places. As a result of the experiment, the following conclusions were obtained: that robots controlled by a neural network can interact with each other, fight for leadership, in some cases in a sophisticated way, that is, the creation of an artificial ecosystem of robots is quite possible, even using the simplest technical solutions in the field of robotics and simple architectures of neural networks; energy supply systems are obviously one of the most critical nodes limiting the creation of robotic complexes and the robosphere. At the same time, developers of robotic complexes develop energy systems of robots based on internal needs, and minimally use the habitat of robots. This observation is one of the arguments supporting our concept of the robosphere.

Key words
Autonomous robot, robosphere, artificial intelligence, neural network.

Acknowledgements
The Electromechanics 360 project is supported by a grant from the Ministry of Education and Science of the Russian Federation within the framework of the federal project "Popularization of Science and Technology" dated 05/03/2024 No. 075-15-2024-492.

Роботы являются сейчас являются одной из тех отраслей техники, которая значительно изменяет окружающий мир и позволяет человеку минимизировать затраты энергии на малоинтеллектуальные, механические виды деятельности [1-5].

И хотя сами роботы известны довольно давно [6-8], но именно последние разработки в области искусственного интеллекта, приближают нас к созданию роботов, способных действительно заменить человека в некоторых сферах жизнедеятельности. Обзор основных направлений исследований в области робототехники приведён в работах [9-12].

При этом количество роботов в мире возрастает с каждым днем. Аналогичный вывод подтверждается исследованиями Omdia [13], в которых сказано, что к 2027 году поставки роботов-гуманоидов превысят 10 000 единиц, а к 2030 году достигнут 38 000 единиц. Это означает, что среднегодовой прирост составит 83% в период с 2024 по 2030 года. Omdia предполагает, что 2024 год станет годом прорыва для человекоподобных роботов благодаря стремительному развитию технологий и искусственного интеллекта. Инвестиции крупных компаний, таких как Boston Dynamics и NVIDIA, сделали роботов-гуманоидов готовыми к массовой коммерциализации, причем этот прорыв ожидается из-за разработок в области искусственного интеллекта, сервоприводов и датчиков. При этом если посчитать количество не только роботов-гуманоидов, а вообще всех робототехнических комплексов, то возможно, к 2030 году человеческое население земли и количество различных роботов будет сопоставимо, что выдвигает крайне важный вопрос существования робота и человека в единой среде биосфере, или реализации искусственной экосистемы роботов-робосферы [14-16].

В настоящем исследовании мы путем эксперимента создаем на основе простых решений в области робототехники и искусственного интеллекта микроскопическую робосферу, в которой реализуется две простые функции роботов: питание роботов и обеспечение лидерства в процессе их деятельности, а также управление роботами с помощью инфосферы. Этим экспериментом мы хотим сделать первый шаг к доказательству возможности создания робосферы. Простые технические решения были выбраны нами для того, чтоб показать базовость полученных результатов: если будет получаться на самых простых решениях, то будет получаться и на сложных.

Сами по себе исследования роботов под управлением искусственным интеллектом довольно известны. Так работа [17] посвящена отдельно тенденциям использования искусственного интеллекта для управления роботами. Разработки нейронных сетей для управления роботами представлены в работах [18, 19]. При этом, очевидно, что большинство работ, посвященных исследованиям управления роботами с помощью искусственного интеллекта направлены на проблемы взаимодействия роботов и человека, роботов и человеческого общества [17–18].

Но для подтверждения концепции робосферы [16], а также концепциям, предложенным в работах [14, 15], актуальным являются исследования взаимодействия между роботами, которые управляются искусственным интеллектом. То есть взаимодействие робот-робот в изолированном от человеческого общества пространстве – робосфере.

Некоторые из исследований в этой области все же производились, например, уникальная имитация, произведенная сотрудниками OpenAI [23]. Которая показала, как может взаимодействовать искусственный интеллект друг с другом. Особенностью этой имитации было то, что среда была также виртуальной. А для аргументации возможностей создания робосферы исследования необходимо проводить в реальной среде.

Поэтому в своей исследовательской работе мы поставили для себя цель, ответить на вопрос как будут вести себя роботы под управлением искусственного интеллекта, находясь в реальной среде при взаимодействии только между роботами (микроскопическая робосфера). Исходя из результатов эксперимента и сравнения его с симуляцией, мы делаем ряд выводов, в том числе о возможности существования робосферы и критических проблемах для ее реализации.

Статья построена следующим образом: в разделе I описана техническая реализация нашего эксперимента. В разделе II описан ход эксперимента, выводы, которые можно получить из него, приведены результаты компьютерного моделирования и сравнение их с результатами эксперимента. В разделе III освещены ряд проблем, которые мы выявили в результате эксперимента, которые требуют дополнительных исследований для создания робосферы. В разделе выводы приведены выводы.

I. Техническая реализация эксперимента. Как отмечалось выше, одной задачей эксперимента являлось не компьютерная имитация, для исследований нейронной сети, а именно исследования взаимодействия робототехнических комплексов под управлением нейронной сетью в реальной среде их функционирования и создание экспериментальной робосферы и инфосферы.

Следуя тому, что при решении задачи должны использоваться максимально простые технические решения для экспериментальных исследований был выбран максимально доступный из готовых роботехнических комплексов- робот-пылесос. Для исследований использовались роботы-пылесосы марки Xiaomi, модель Mi Robot Vacuum s5.

Для проведения экспериментов у роботов было изменено их программное обеспечение для возможности управлять ими удаленно. Вычисления, запросы и управления роботами осуществлялось с удаленного персонального компьютера (в эксперименте вычислительный компьютер можно считать инфосферой). Для этого была переустановлена операционная система робота пылесоса вместе с Valetudo. После чего появилась возможность взаимодействия роботов и вычислительного центра, направления из вычислительного центра к роботам запросов, управляющих сигналов, а также удаленное получение информации о состоянии роботов.

Эксперимент производился следующим образом: три робота были помещены в изолированное помещение, в котором поддерживалась температура +19 оС. В 4 точках помещения были установлены видео камеры, которые обеспечивали прямую трансляцию в режиме реального времени. Важно отметить, что для чистоты эксперимента видео трансляции мы сохранили по следующей ссылке (www.youtube.com/watch?v=hO6jDQcxg0g). Платформа, в которой находились роботы имела площадь 15 м2, при этом на высоте 2 м была установлена еще одна камера, которая обеспечивала связь роботов и вычислительного центра.

У каждого из роботов была использовалась абсолютно одинаковая нейронная сеть. Задача, которая была поставлена роботам, состоит в закрашивании клеток на поле (комната разбита на виртуальные клетки). При этом робот, который закрасил больше клеток за один раунд игры, получает 10 баллов, а роботы, которые проиграли ему, штрафуются на 10 баллов. Раунд игры ограничен 250 движениями каждого робота, если он не на зарядке. В ходе раунда каждый робот получает 1 балл, если он закрасил новую клетку, штрафуется на 1 балл, если он повторно закрасил свою клетку. Если он закрасил чужую клетку, он получает 0 баллов. Количество раундов за день может достигать 500-700, это необходимо для обучения нейронной сети каждого робота. Целью каждого робота является лидерство, причем все три робота знают, у какого робота больше всех баллов и кто является лидером.

Вопросы, на которые мы хотим ответить по результатам эксперимента:

1. Будут ли роботы выстраивать свой социум-робосферу и приобретать индивидуальность поведения?
2. Как будет вести себя лидер?
3. Когда лидер осознает свой большой отрыв от других, начнет ли он лениться?
4. Какое будет поведение аутсайдера? Он сдастся или будет бороться до самого конца?
5. Как будет меняться поведение роботов каждый день?
6. Будут ли между роботами возникать партнёрства?
7. И, наконец, самый сложный вопрос, на который мы хотим найти ответ: возможна ли не только интеллектуальная, но и материальная автономная эволюция роботов? То есть может ли робот под воздействием окружающей среды и социума изменить себя физически. Например, разрушить свой корпус-оболочку.

Выбор архитектуры нейронной сети и количества слоев для реализации эксперимента. Реализации стратегии игры и поведения роботов была реализована посредством самообучающейся нейронной сети.

Применение нейронных сетей для управления роботами используется довольно давно. Изначально они были лишь частью системы управления и выполняли ту или иную функцию, например, регулировку коэффициентов управления, выбор направления движения, коррекцию скорости, идентификацию информации с датчиков и так далее. Для этих операций можно использовать простейшие архитектуры нейронных сетей, доказавшие свою эффективность. Далее, по мере развития технологий искусственного интеллекта нейронные сети начали применять для обеспечения движения роботов.

Так в [23] используют простую рекуррентную сеть для того, чтобы роботы структурировали пространство вокруг себя, выбирая направление движения. На входе нейросеть получает информацию от датчиков уровня освещенности, а на выходе — команды для управления моторами колес. В исследовании [24] рекуррентная нейронная сеть с обратной связью применяется для управления мобильным роботом с двумя ведущими колесами и шаровым роликом. Динамическая нейронная сеть содержит один скрытый слой, состоящий из 10 нейронов с функцией активации тан-сигмоиды и одного нейрона на выходе с функцией линейной активации. На вход сети подается погрешность положения робота относительно черной полосы, а на выходе формируются линейные скорости левого и правого колес.

В работе [25] обучение сверточных нейронных сетей проводится на архитектурах MobileNetV2, ResNet50 и DenseNet121 с добавлением блока Squeeze-and-Excitation (SE) также для визуальной обработки информации и роботизированного управления. Капсульная сверточная нейронная сеть (CapsNet) проанализирована в работе [26] для роботизированного управления. В работе [27] используется сверточная нейронная сеть для выделения дронов и птиц. В работе [28] для задач рекуррентные нейронные сети (Recurrent Neural Networks, RNN) для классификации судов. В работе [29] рассматривается спайковая нейронная сеть для задач управления робототехническими комплексами. В работе [30] рассматривается Fully Connected Neural Network (FCNN) для задач управления роботами.

В тоже время, задача, которая была поставлена нами имела не тривиальный характер, по сравнению с [23-30], так как она была направлена не на обеспечение движения роботов, а на выполнение ими конечной задачи, несвязанной с человеком, а связанной только с взаимодействием робот–робот.

Поэтому перед решением поставленной задачи, мы провели анализ архитектур нейронных сетей, чтоб выявить наиболее рациональную для нашего случая. Исходя из многообразия решений в части архитектуры нейронных сетей, применяемых в настоящее время для задач управления роботами, далее для наиболее рационального выбора архитектуры, мы рассматриваем достоинства и недостатки каждой из указанных выше архитектур для решения задачи закрашивания поля роботами-пылесосами. Рассмотрены полносвязные нейронные сети (Fully Connected Neural Networks, FCNN), сверточные нейронные сети (Convolutional Neural Networks, CNN) и. Проведен сравнительный анализ их плюсов и минусов с точки зрения их применимости к поставленной нами задаче.

Полносвязная нейронная сеть (Fully Connected Neural Network, FCNN). Преимущества:

– Простота реализации: Полносвязные нейронные сети обладают простой структурой и легко настраиваются, что делает их удобными для быстрой разработки и обучения.

– Эффективность на малых данных: в условиях небольшого размера поля и ограниченного количества возможных состояний, полносвязные сети могут показывать высокую эффективность. В нашем эксперименте поле является относительно не большим.

– Универсальность: FCNN не предполагают специфических структурных предположений о данных, что делает их применимыми для широкого спектра задач.

Недостатки:

– Неоптимальное использование структуры данных: Полносвязные сети игнорируют пространственную структуру данных, что может снижать эффективность обучения на более сложных задачах, где важны локальные зависимости.

– Сложность масштабирования: С увеличением размера поля количество параметров сети растет экспоненциально, что усложняет процесс обучения и увеличивает вычислительные затраты.

Сверточная нейронная сеть (Convolutional Neural Network, CNN). Преимущества:

– Учет пространственной структуры: CNN эффективно обрабатывают данные с локальными зависимостями, что особенно полезно для задач, связанных с изображениями и закрашиванием ячеек.

– Меньше параметров: Использование сверток позволяет значительно сократить количество параметров по сравнению с полносвязными сетями, особенно на больших полях, что ускоряет обучение.

– Перенос знаний: Обученные фильтры могут распознавать важные паттерны, которые можно использовать в других частях поля.

Недостатки:

– Сложность реализации: Настройка и обучение CNN требует значительных усилий, особенно если данные не имеют очевидной пространственной организации.

– Требовательность к данным: для эффективного обучения CNN необходимо больше данных, что может быть проблематично в условиях ограниченного количества примеров.

Рекуррентная нейронная сеть (Recurrent Neural Network, RNN). Преимущества:

– Учет последовательности: RNN хорошо справляются с задачами, где важна последовательность действий или данных, что актуально для последовательного закрашивания ячеек.

– Хранение состояния: Способность RNN запоминать предыдущие состояния помогает в задачах, где текущие действия зависят от прошлых шагов.

Недостатки:

– Сложность обучения: Обучение RNN может быть затруднено проблемами градиентного затухания или взрыва, особенно на длинных последовательностях.

– Медленные вычисления: Рекурсивная природа RNN замедляет их работу на больших данных или длинных последовательностях.

В рамках нашего эксперимента задача закрашивания ячеек, оказалась относительно простой и не требующей сложного учета пространственных зависимостей или последовательностей действий. Небольшой размер поля и ограниченное количество возможных состояний способствовали эффективному обучению полносвязной сети без необходимости в более сложных архитектурах. Это объясняет, почему в данном конкретном случае полносвязная нейронная сеть показала лучшие результаты. Также это соответствует поставленной нами цели–применять простые технические решения.

Следующим этапом для реализации эксперимента являлся выбор числа слоев нейронной сетки. Изначально мы решили использовать количество слоев 6-10, для того, чтобы во время обучения модель обучалась сложным паттернам движения роботов.

Но на симуляции было установлено, что данный вариант не приводит к хорошим результатам. А именно модель не обучается на продолжительное время. Это может быть связано с тем, что модель имеет большое количество параметров, и для ее обучения нужно огромное количество времени.

После мы попробовали модель с 2 слоями. На симуляции она показала хорошую сходимость. Но в реальном обучении она не дала никаких результатов. Это связано с тем, что в реальности движение роботов по сравнению с симуляцией более хаотичное, и двухслойный перцептрон может не уловить этого. Было принято решение архитектуру с 4 слоями и 1024 параметров в каждом. Модель для каждого робота приведена на рисунке 1.

Рисунок 1 — Модель используемой нами нейронной сети для каждого робота

В качестве функции активации была использована функция ReLU. Входной слой нашей модели имеет 35 параметров. А именно, во время шага игры мы собирает состояния роботов: в радиусе 1 клетки вокруг агента мы собираем информацию о клетках (закрашена, свободна, является стеной)

А также, чтобы роботы знали о положении себя и других роботов в игре, передается информация:

- является ли он лидером в данной игре, или нет;
- его координаты на поле;
- угол его поворота относительно построенного начала координат;
- выходной слой имеет 3 параметра, а именно:
  - вероятность повернуть налево;
  - вероятность повернуть направо;
  - вероятность поехать прямо.

В зависимости от вероятности каждого выхода, мы берем максимальный, и в дальнейшем подаем команду роботу двигаться.

II. Ход эксперимента. Результаты каждого дня нашего эксперимента, а также все видеозаписи выложены по ссылке (www.youtube.com/watch?v=hO6jDQcxg0g). На рисунке 2 приведены некоторые скрины из нашего эксперимента. На рисунке 3 приведены результаты двух игр роботов.

К сожалению, нам пришлось остановить исследования на 27 день, так как роботы пылесосы вышли из строя по причине отказа аккумуляторных батарей. По нашим данным, роботы проработали около 600 часов (+ закрытые тесты на 120 часов). Их ресурс был полностью исчерпан за 27 дней непрерывной работы. В среднем робот за год проезжает 150 часов, это если убираться 3 раза в неделю, на протяжении 365 дней. А наши роботы смогли проехать за 27 дней 720 часов.

За время исследований лидерство между роботами изменялось: то есть первые дни лидером являлся зеленый робот, после в лидеры вырвался оранжевый робот, но конечным результатом эксперимента лидером стал оранжевый робот со счетом 122 685 баллов. На второй позиции стал зеленый робот со счетом 118 980. Синий робот вышел из строя, не дойдя до конца эксперимента. Важно отметить, что за все время эксперимента синий робот не занимал лидерских позиций.

Анализ видеозаписей и наблюдения за роботами показали, что моменты/события, которые были совершены роботами, можно разделить на два типа:

События, связанные с неисправностью/поломкой датчиков и деталей роботов-пылесосов, случайные события. К таким событиям мы относим частое столкновение роботов друг с другом. За движение роботов отвечает система навигации, а она в нашем эксперименте была базовой. Так же напомним тот факт, что площадь помещения не превышает 15м^2, что также повлияло на частоту столкновений роботов друг с другом. Кроме того,

к случайным событиям мы относим столкновения роботов об стены и выход из строя роботов и сети передачи данных. Возможно, эти события (или как часть данных событий) могут являться сознательными действиями роботов под управлением искусственного интеллекта, но доказательной базы у нас для этого нет. Поэтому будем считать их случайными.

Рисунок 2 — Ход эксперимента

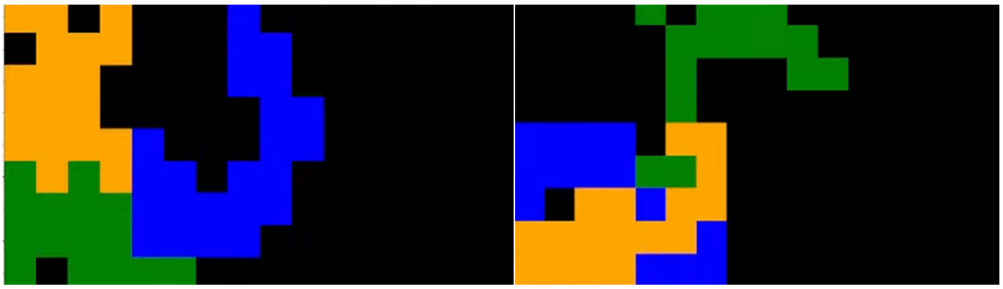


Рисунок 3 — Результаты двух игр подряд

События, на которые повлиял внедренный искусственный интеллект; теперь перейдём к тем моментам, где, на наш взгляд, влияние искусственного интеллекта кардинально изменило поведение роботов-пылесосов.

– Преждевременное покидание одним роботом зарядной станции. Такую ситуацию мы наблюдали несколько раз, например, на 11 день после начала эксперимента. Трое роботов: зелёный, синий, оранжевый стояли на зарядных станциях. Оранжевый преждевременно завершает процесс заряда, понимая, что два других робота в данный момент не активны, следовательно, можно обеспечивать свое лидерство.

– Изгнание с зарядной станции одного робота другим с целью прекращения ресурсобеспечения роботов. Эту ситуацию мы наблюдали практически сразу после начала эксперимента и на всем его протяжении. То есть роботы, если у них тесть такая цель могут бороться за лидерство агрессивно.

– Выход из строя синего робота привел к тому, что двум другим роботам пришлось снова переобучаться в связи с изменением внешней среды. Это наблюдение, на наш взгляд также является весьма интересным и показывает.

– Изменение характера движения роботов от хаотичного к осознанному закрашиванию. Во время эксперимента по мере обучения нейронной сети это становилось очевидным.

– Появление лидера. Одинаковые роботы с одинаковой нейронной сетью получали разные результаты, и в конечном счете после 15 дней эксперимента появился устойчивый лидер, который это лидерство поддерживал.

Для сравнения результатов с эксперимента с данными компьютерного моделирования, мы разработали симуляцию с использованием библиотеки Pygame. Симуляция включает в себя трех роботов разного цвета, которые соревнуются в закрашивании клеток в комнате. В каждом запуске роботы стремятся закрасить как можно больше клеток, перемещаясь по сетке. Ниже приведено описание ключевых аспектов этой симуляции.

Алгоритмы, заложенные в симуляции, соответствовали стратегии эксперимента, представленной выше.

Важно отметить, что при симуляции не учитывались реальные физико-технические характеристики робототехнических комплексов, а также среды, в которой они находились. Основные параметры и инициализация

Симуляция начинается с инициализации нескольких ключевых параметров:

– Размеры окна (w и h), задающие область симуляции.

– Размер ячейки сетки (cell_size), определяющий дискретизацию пространства.
– Порог итераций (iterations_threshold), после достижения которого игра завершается.
– Начальные позиции роботов (initial_positions).
– Цвета роботов и их следов, генерируемые с помощью функции generate_equidistant_colors.
– Метод reset используется для инициализации состояния игры. Он устанавливает начальные позиции роботов и обнуляет счетчики итераций и очков.
– Метод play_step отвечает за выполнение одного шага симуляции. Он обновляет позиции роботов, рассчитывает награды и проверяет условия завершения игры.
– Метод _move обрабатывает действия роботов и обновляет их позиции. Выбор действия определяется на основе вероятностей действий, предоставленных агентом.
– Метод _update_ui обновляет графический интерфейс симуляции, отображая текущее состояние сетки и позиции роботов.

На рисунке 4 приведена компьютерная симуляция.

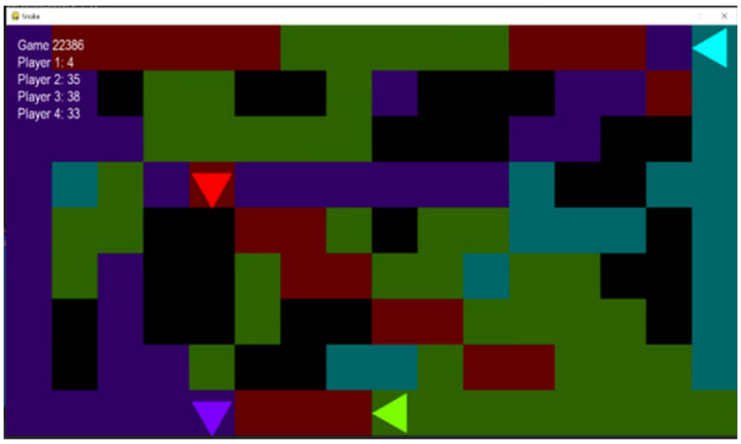


Рисунок 4 — Окно симуляции Pygame

Результаты симуляции приведены на графиках, рисунок 5. На первом графике, полученном в результате симуляции за общее количество игр 30000, видно, что оранжевый робот (Player 2) обучился как лидер и на протяжении большого количества игр занимал первое место. Явного аутсайдера выявить не удалось, но можно предположить, что это Player 3, в большинстве игр его среднее количество игр – минимальное. Это демонстрирует эффективность обучения с подкреплением в контролируемой симуляционной среде. Роботы постепенно улучшали свои стратегии и достигали высоких результатов в закрашивании клеток. На рисунке 6 представлен график, полученный в ходе экспериментальных исследований.

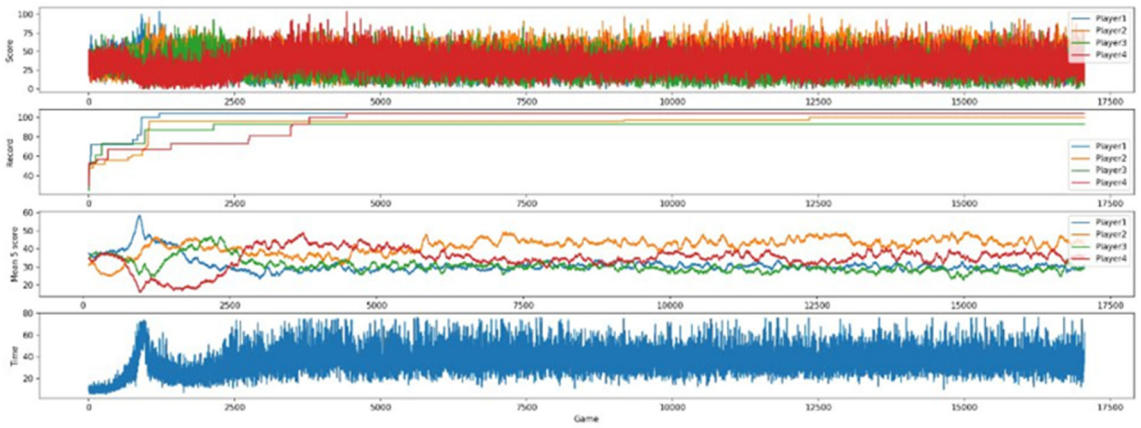


Рисунок 5 — График обучения в симуляции

Такие факторы в реальной среде как отключение электроэнергии и интернета, неоднородность поверхности и непредсказуемые препятствия и неисправности в оборудовании значительно увеличили время обучение в реальности по сравнению с симуляцией. Например, за 6000 игр которые прошли за 2 дня в симуляции появился явный лидер, в то время как в реальной среде за тоже самое количество игр, которые длились 14-15

дней отсутствуют явные результаты. Экспериментальные зависимости (рисунок 10) показывают большую вариативность и нестабильность результатов по сравнению с симуляцией. Обучение происходило медленнее, и роботы не всегда могли удерживать лидерство (лидерство менялось между зеленым роботом и оранжевым).

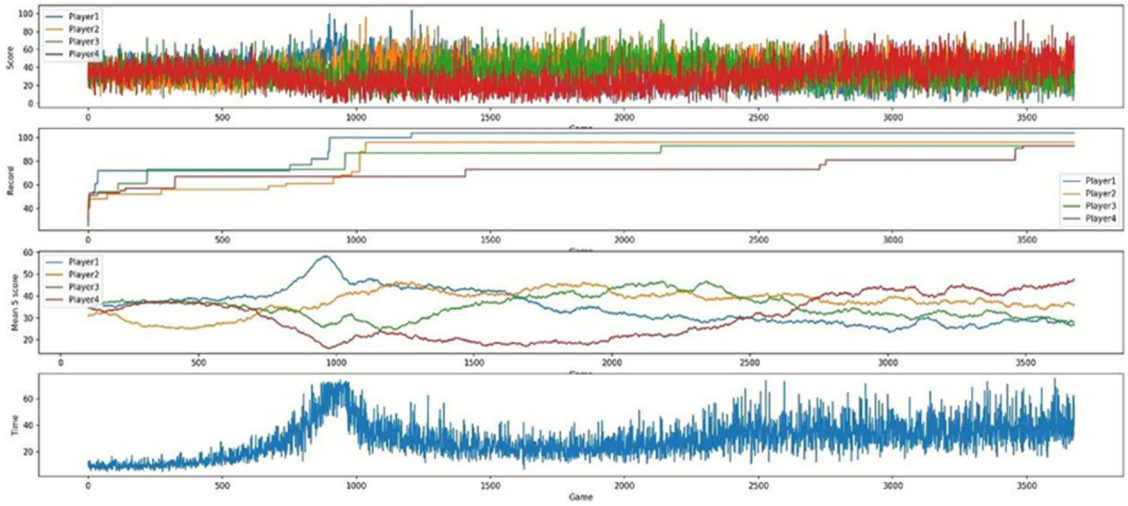


Рисунок 6 — График обучения в реальной среде

То есть сравнивая результаты имитации и эксперимента можно сделать вывод:

1. Эффективность обучения: В симуляции роботы обучались быстрее и достигали стабильных результатов, так как условия были контролируемыми и предсказуемыми. В реальной среде обучение было менее эффективным из-за множества внешних факторов.
2. Стабильность результатов: В симуляции результаты были стабильнее, оранжевый робот занимал лидерские позиции. В реальной среде результаты были более вариативными и менее предсказуемыми, но при этом лидер по результатам всех игр также стал оранжевый робот, возможно, это обусловлено его начальной позицией.
3. Факторы среды: В реальной жизни множество факторов могут повлиять на обучение, что требует больше времени и ресурсов для достижения аналогичных результатов, как в симуляции.

III. Результаты эксперимента для развития робосферы. Так как, в нашем эксперименте мы создали упрощенную робосферу, то необходимо рассмотреть его результаты с этой позиции. Тот факт, что роботы существовали самостоятельно без участия человека и выполняли свои функциональные задачи, говорит о том, что робосфера, как искусственная среда функционирования роботов может быть создана. То есть наш эксперимент подтверждает работы [15-17]. Важно отметить, что обеспечение роботов электроэнергией осуществлялось от сети и они сами выбирали время, когда им необходимо получать энергию из внешнего мира. Что кстати отчетливо показывает поведение оранжевого робота в нашем эксперименте, который преждевременно покидал зарядную станцию.

Вместе с тем, прекращение эксперимента произошло по причине отказа роботов из-за частых зарядов аккумуляторных батарей роботов. Это говорит об основной проблеме функционирования робосферы, энергообеспечению роботов. В нашем случае, хоть роботы и получали энергию из электрической сети, сам по себе износ аккумуляторных батарей привел к разрушению их робосферы.

Этот вывод, ставит дополнительные вопросы к результатам [15], где говорится, что фундаментальной проблемой существования робосферы является алгоритмы энергообеспечения роботов и перераспределения энергии между ними. На основе нашего эксперимента мы видим, что фундаментальной проблемой является количество циклов разряда/заряда аккумуляторных батарей, при условии, что роботы получают энергию из внешней сети или даже перераспределяют ее между собой. То есть требования к аккумуляторным батареям роботов при функционировании их в робосфере это не максимальная емкость аккумуляторных батарей, а максимальное количество циклов заряда/разряда.

Этот вывод и анализ процессов, происходящих в живой природе, позволяет нам предложить несколько иной подход к энергообеспечению роботов, который вполне гармонично вписывается в наши исследования робосферы.

Мы предлагаем перестроить энергоснабжение роботов в робосфере по принципу пищевых цепочек в живой природе.

В ведении мы привели факт о распространении роботов гуманоидов, а помимо них существует беспилотные летательные аппараты и множество других роботов, которые выполняют различные функции. И все эти

виды, классы, подвиды роботов зависят в глобальном плане от энергоситемы. И все они напоминают виды живых организмов, обитающих в биосфере.

Мы предлагаем перестроить алгоритмы энергоснабжение роботов в робосфере по принципу пищевых цепочек биосферы, то есть создать роботов, задача которых будет перенос аккумуляторных батарей. Роботы другого класса смогут «съедать» этих роботов переносчиков получая от них энергию. То есть воссоздать в среде робтов-робосфере пищевые природные цепочки, участниками которых являются различные типы роботов. Экспериментальные исследования подобного подхода будут нашим следующим шагом, в котором мы экспериментально попробуем воссоздать пищевую цепочку роботов в робосфере.

Выводы. Нами была разработана методика эксперимента взаимодействия системы робот–робот под управления искусственного интеллекта и реализована искусственная робосфера под управление инфосферы. Данный эксперимент реализовывался нами в течении 27 дней (без учета дополнительных тестов системы). Для реализации эксперимента использовались роботы-пылесосы, которые все это время находились в собственной изолированной экосфере, при минимальном вмешательстве человека.

В результате 27 дней наблюдений, были получены следующие выводы:

– что роботы под управлением нейронной сети могут взаимодействовать друг с другом, бороться за лидерство, в ряде случаев изощренно, то есть создание искусственной экосистемы роботов является вполне возможным, даже с использованием самых простых технических решений в области робототехники и простых архитектур нейронных сетей;

– системы энергообеспечения, очевидно, являются одним из самых критических узлов, ограничивающих создание робототехнических комплексов и робосферы. При этом разработчики робототехнических комплексов развивают энергетические системы роботов исходя из внутренних потребностей, и минимально используют среду обитания роботов. Данное наблюдение является одним из аргументов, подтверждающих нашу концепцию робосферы.

Выводы, которые мы считаем подтверждаются и результатами эксперимента, и данными компьютерного моделирования:

– появление среди трех одинаковых роботов лидера. Одинаковые роботы с одинаковой нейронной сетью получали разные результаты, и в конечном счете после 15 дней эксперимента появился устойчивый лидер, который это лидерство поддерживал;

– изменение внешних условий, приводит к эволюционным развитию и переобучению нейронной сети;

– использование систем искусственного интеллекта только по результатам компьютерной симуляции, без проведения тестирования на реальных объектах не следует допускать, потому что реальная среда значительно изменяет поведение робототехнических комплексов, по сравнению с данными компьютерного моделирования;

Ответы, на вопросы, на которые мы хотели получить по результатам эксперимента, звучат так:

1. Будут ли роботы выстраивать свой социум-робосферу и приобретать индивидуальность поведения? Да. Роботы приобретали индивидуальность поведения. Во время эксперимента мы наблюдали групповое взаимодействие двух роботов на третьего робота. Подтверждается данными симуляции и эксперимента.

2. Как будет вести себя лидер? Лидер будет стремится удерживать лидерство. Подтверждается данными симуляции и эксперимента.

3. Когда лидер осознает свой большой отрыв от других, начнет ли он лениться? Ответ на вопрос не удалось получить, так глобального отрыва (в 2 раза) между роботами мы не достигли. Подтверждается данными симуляции и эксперимента.

4. Какое будет поведение аутсайдера? Он сдастся или будет бороться до самого конца? Аутсайдер, в нашем не проявлял достаточной активности

5. Как будет меняться поведение роботов каждый день? Поведение роботов менялось, становилось осмысленным, появлялась борьба за лидерство. Подтверждается данными симуляции и эксперимента.

6. Будут ли между роботами возникать партнёрства? В ряде наблюдений нам казалось, что да. Но однозначно и аргументированно на этот вопрос мы не получили ответа.

7. И, наконец, самый сложный вопрос, на который мы хотим найти ответ: возможна ли не только интеллектуальная, но и материальная автономная эволюция роботов? То есть может ли робот под воздействием окружающей среды и социума изменить себя физически. Например, разрушить свой корпус-оболочку.

На наш взгляд, здесь мы увидели фундаментальный вывод от том, что изменение внешней среды приводит к интеллектуальной эволюции роботов и изменению их стратегии. Материальной эволюции роботов мы не видели, но не отрицаем, что она возможна в достаточном для этих процессов периоде времени.

Также нами был предложен новый подход к энергобеспению роботов, основанный на проектировании для робосферы пищевых цепочек роботов, аналогичных пищевым цепочкам биосферы. Реализация и исследования данного подхода будут продолжением наших исследовательских работ.

Литература

1. С. Дж. Китинг, Дж. С. Лиланд, Л. Кай и Н. Оксман, «На пути к созданию роботов, ориентированных на конкретные объекты и самодостаточных в архитектурном масштабе», Science Robotics, том 2, № 5, 2017.
2. Н. Якобштейн, Дж. Беллингем и Г.-З. Янг, «Робототехника для космических и морских наук», Sci. Robot., том 2, № 1, 2017.
3. К. Ласки, Б. Маццолаи и М. Чианчетти, «Мягкая робототехника: технологии и системы, расширяющие границы возможностей роботов», Sci. Robot., том 1, № 1, 2016.
4. E. W. Hawkes, L. H. Blumenschein, J. D. Greer and A. M. Okamura, «A soft robot that navigates its environment through growth», Sci. Robotics, vol. 2, no. 8, pp. eaan3028, 2017.
5. С. Террин, Дж. Бранкарт, Д. Лефебер, Г. Ван Аше и Б. Вандерборгт, «Самовосстанавливающиеся мягкие пневматические роботы», Sci. Robot., том 2, № 9, стр. eaan4268, август 2017 г.
6. Э. Г. Келлер, К. А. Лаубшер и Р. Д. Грегг, «Обнаружение изменений походки с помощью проприоцептивного измерения силы в протезе коленно-голеностопного сустава с электроприводом: проверка скорости ходьбы и наклонов», Международная конференция IEEE по робототехнике и автоматизации (ICRA), Лондон, Великобритания, 2023, стр. 10464-10470, doi: 10.1109/ICRA48891.2023.10161102.
7. Г.-З. Янг и др., «Грандиозные задачи научной робототехники», Sci. Robot., том 3, № 14, 2018.
8. Т. Миколайчик и др., «Источники энергии в системах питания мобильных роботов: систематический обзор и сравнение эффективности», Приложение Sc., том 13, № 13, стр. 7547, 2023.
9. Ф. Рубио, Ф. Валеро и К. Ллопис-Альберт, «Обзор мобильных роботов: концепции, методы, теоретические основы и приложения», Int. J. Adv. Robotic System, том 16, № 2, апрель 2019 г.
10. М.Т. Баллестар, А. Диас-Чао, Дж. Сайнс, Дж. Торрент-Селленс, «Знания, роботы и производительность на малых и средних предприятиях: объяснение второй цифровой волны», J. Bus. Res., том 108, стр. 119-131, 2020.
11. О. М. Гуль и А. М. Эркмен, «Энергоэффективный кластерный сбор данных беспилотным летательным аппаратом с батареей ограниченной емкости в роботизированных беспроводных сенсорных сетях», Sensors, том 20, № 20, стр. 5865, октябрь 2020 г.
12. Т. Чен, Дж. Чен, Х. Гао и Т. Чен, «Стратегия мобильной зарядки для беспроводных перезаряжаемых сенсорных сетей», Sensors, том 22, стр. 359-382, январь 2022 г.
13. Omdia: Мировые поставки роботов-гуманоидов превысят 10 000 единиц к 2027 году и достигнут 38 000 единиц к 2030 году // en.prnasia.com/releases/apac/omdia-global-humanoid-robot-shipments-to-exceed-10-000-units-by-2027-and-reach-38-000-units-in-2030-455289.shtml
14. С. Коломбано, «Робосфера: самоподдерживающаяся роботизированная экология как предвестник освоения планеты человеком», конференция и выставка AIAA Space 2003, Лонг-Бич, Калифорния, стр. 6278, doi: 10.2514/6.2003-6278.
15. Х. Ненгао, Л. Тайбо, Л. Хунвэй и Х. Лей, «Моделирование и имитационный анализ поведения при принятии решений о самообеспечении энергией в экосфере роботов», Международная конференция по сервисной робототехнике (ICoSR) 2022 года, Чэнду, Китай, 2022, стр. 10-14, doi: 10.1109/ICoSR57188.2022.00012.
16. V. E. Vavilov, The concept of creating robots and the robosphere // Proceedings of the XIX All-Russian Scientific and practical conference «Promising management systems and tasks». April 1-5, 2024, Dombai village
17. Б. Л. Чен, Д. Х. Холл и Д. Б. Чкловский, «Оптимизация проводимости может связать структуру и функцию нейронов», Труды Национальной академии наук Соединенных Штатов Америки, том 103, № 12, стр. 4723-4728, 2006.
18. С. И. Баргманн, «Хемосенсорика у c. Elegans», WormBook, стр. 1-29, 2006.
19. А. Л. Николс, Т. Эйхлер, Р. Латам и М. Циммер, «Глобальное состояние мозга лежит в основе поведения c. elegans во время сна», Science, том 356, № 6344, стр. 6851, 2017.
20. Э. Л. Ардиэль и К. Х. Рэнкин, «Элегантный разум: обучение и память у Caenorhabditis elegans», «Обучение и память», том 17, № 4, стр. 191-201, 2010.
21. Р. Хасани, М. Фукс, В. Бенедер и Р. Гросу, «Представление о неассоциативном обучении в нервной системе нематоды caenorhabditis elegans», препринт arXiv arXiv: 1703.06264, 2017.
22. М. Чалфи, Дж. Э. Салстон, Дж. Г. Уайт, Э. Саутгейт, Дж. Н. Томсон и С. Бреннер, «Нейронная цепь, отвечающая за сенсорную чувствительность у caenorhabditis elegans», Журнал неврологии, том 5, № 4, стр. 956-964, 1985.
23. Р. Хасани, М. Лехнер, А. Амини, Д. Рус и Р. Гросу, «Рекуррентные нейронные сети Liquid с постоянной временем как универсальные аппроксиматоры», препринт arXiv arXiv: 1811.00321, 2018.
24. Р. М. Хасани, М. Лехнер, А. Амини, Д. Рус и Р. Гросу, “Перепрофилирование политик компактных нейронных цепей для управления задачами обучения с подкреплением”, препринт arXiv arXiv: 1809.04423, 2018.
25. Т. Салиманс, Дж. Хо, Х. Чен и И. Суцкевер, «Эволюционные стратегии как масштабируемая альтернатива обучению с подкреплением», 2017.

26. Ю. Дуань, Х. Чен, Р. Хоутхофт, Дж. Шульман и П. Эббил, «Сравнительный анализ глубокого обучения с подкреплением для непрерывного контроля», Международная конференция по машинному обучению, 2016, стр. 1329-1338.

27. Х. Манья, А. Гай и Б. Рехт, «Простой случайный поиск обеспечивает конкурентный подход к обучению с подкреплением», препринт arXiv arXiv: 1803.07055, 2018.

28. А. Брабазон, М. О'Нил и С. Макгарраги, «Алгоритмы естественных вычислений», 1-е изд. Издательство Springer, Incorporated, 2015.

29. Ю. Лекун, Ю. Бенджио и Г. Динтон, «Глубокое изучение», Nature, стр. 436-444, май 2015 г.

30. М. Фолгерайтер, Г. Джини, А. Нава и Н. Моттола, «Биоинспирированный нейронный контроллер для мобильного робота», Международная конференция IEEE по робототехнике и биомиметике, декабрь 2006 г., стр. 1646-1651.

31. М. Д. Капуоццо и Д. Л. Ливингстон, «Компактный эволюционный алгоритм для нейросетевых роботизированных контроллеров с целочисленными всплесками», в 2011 году, Труды IEEE Southeastcon, март 2011, стр. 237-242.

Информация об авторах

Вавилов Вячеслав Евгеньевич, д.т.н., профессор, директор, Передовая инженерная школа «Моторы будущего», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский университет науки и технологий» (ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий»), Россия, Республика Башкортостан, 450008, г. Уфа, ул. Карла Маркса, д. 12, vavilov.ve@ugatu.su

Хусаинова Айгуль Аминовна, заместитель директора по экономическим исследованиям и маркетингу, Передовая инженерная школа «Моторы будущего», ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий», Россия, Республика Башкортостан, 450008, г. Уфа, ул. Карла Маркса, д. 12, aygul-94@mail.ru

Б.В. Галицков, О.М. Ахунов, М.С. Максимов, В.А. Нугаев, Р.Р. Хазиев, студенты, ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий», Россия, Республика Башкортостан, 450008, г. Уфа, ул. Карла Маркса, д. 12, pish@ugatu.su

Применение архитектуры CLIP в задаче распознавания сцен для локализации мобильного робота

А.Д. Московский
Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» (НИЦ КИ), Москва, Россия, moscowskyad@yandex.ru

Аннотация
В работе рассматривается задача распознавания сцен, являющаяся частью подхода семантической визуальной локализации робота. В решаемой задаче требуется произвести сопоставление наблюдаемых роботом объектов и семантической карты, также состоящих из объектов. В работе рассматриваются два метода распознавания сцен, на основе подхода на графах, которые позволяют находить геометрические особенности взаимоположения объектов. Эти методы были модифицированы так, чтобы учитывать визуальную похожесть объектов, которая определяется при помощи построения векторных представлений объектов с помощью нейросетевой архитектуры CLIP. Эксперименты, проведенные на модификации открытого набора данных KITTI-360, показали в среднем 34% увеличение по точности предлагаемых модификаций в сравнении с оригинальными подходами.

Ключевые слова
Визуальная локализация, распознавание сцен, сопоставление данных, подходы на графах, CLIP.

Благодарности
Работа проведена в рамках выполнения государственного задания НИЦ «Курчатовский институт».

Application of CLIP arhitecture in global robot localization task

Anton D. Moscowsky
National research center «Kurchatov institute» (NRC KI), Moscow, Russia, moscowskyad@yandex.ru

Abstract
The paper considers the task of scene recognition, which is part of the approach of semantic visual robot localization. The problem being solved requires matching the objects observed by the robot with the semantic map, which also consists of objects. The paper considers two methods of scene recognition, based on the graph approaches, which allow finding geometric features of the relative positions of objects. These methods were modified to take into account the visual similarity of objects, which is determined by constructing vector representations of objects using the CLIP neural network architecture. Experiments conducted on a modification of the open KITTI-360 dataset showed an average 34% increase in the accuracy of the proposed modifications compared to the original approaches.

Key words
Visual localization, scene recognition, data association, graph approaches, CLIP.

Acknowledgements
The work was carried out within the state assignment of NRC «Kurchatov institute».

Введение

Задача визуальной локализации на основе наблюдаемых роботом объектов изучается некоторое время разными исследователями. Такая локализация обычно подразумевает наличие семантической карты – размеченных в пространстве объектов, а система распознавания робота также должна иметь возможность определять их положение. Несмотря на то, что такой подход показывает точность ниже, чем подходы, основанные на лидарах и строящие трехмерную карту местности в виде облака точек, он позволяет бороться с некоторыми проблемами последних: проблемой ракурса, большими размерами [1], а также повторяющимися (периодичными) и симметричными средами. Выглядит целесообразным для начала провести анализ на уровне семантики, а далее уточнить положение с помощью методов, работающих с облаками точек.

Задача распознавания сцен часто решается с помощью подходов, основанных на теории графов. Граф – удобное представление как сцены, так и семантической карты. Объекты выступают в качестве вершин, а ребра – некие отношения между объектами, обычно основанные на евклидовом расстоянии между объектами. Среди таких методов можно выделить методы на основе дескрипторов случайного блуждания [2], [3], поиска наибольшей клики [4] и комбинированные методы [5]. Автором также был предложен метод на основе поиска изоморфного подграфа [6], который показал результаты, сравнимые с другими методами, и был расширен на

ситуации неопределённости, включающие в себя большие погрешности в определении расстояний и ошибки систем распознавания [7]. Все перечисленные методы работают исключительно с геометрическими особенностями во взаиморасположении объектов, все объекты одного класса являются неразличимыми. Однако современные подходы в техническом зрении развивают методы эффективного кодирования изображений в виде численных векторов (векторизации), которые емко отражают визуальную информацию [8]. Применительно к работе с произвольными объектами прорыв в этой области совершило введение архитектуры CLIP [9], которая показывает высокую робастность в векторизации изображения за счёт одновременного обучения на их текстовом описании. Определённые попытки использовать эту возможность в задачах локализации уже проводились [10], [11], однако они используют лишь визуальную похожесть объектов, без выявления геометрических особенностей. Поэтому в данной работе исследуется возможность улучшения методов на основе поиска изоморфного подграфа [7] и поиска наибольшей клики [4] с помощью данных, полученных от CLIP.

Предлагаемые методы

Постановка задачи

Даны два множества: семантическая карта M и сцена S. Каждое множество есть набор объектов o, который характеризуется своим семантическим классом c, положением в пространстве p (причем в своей системе координат для обоих множеств, связь между которыми не известна) и визуальным образом I (одним или несколькими изображениями данного объекта). Требуется найти сопоставление f из S в M, которое бы сохраняло класс объектов, а также лучшим образом отражало взаимоположение объектов и их визуальное сходство.

Метод на основе поиска наибольшей клики

Авторами работы [4] был предложен эффективный метод распознавания сцен, который строит граф определённого вида, а далее производит на нём поиск наибольшей клики – полносвязного подграфа с наибольшим числом вершин. Такие подграфы описывают лучшие соответствия между множествами S и M. Наибольших в клик в графе может быть больше одной, однако авторы работы не предлагают способа ранжирования этих решений. В работе [7] была предложена модификация данного метода, которая сопоставляет каждому решению численную оценку. Данная оценка может быть расширена так, чтобы учитывать и визуальное сходство объектов. Вершина v каждой получившейся в ходе метода клики C кодирует соответствие двух объектов o^S и o^M из множеств S и M одного класса. Пусть E_C множество рёбер C, тогда численная оценка качества решения (коэффициент уверенности) задачи распознавания сцен будет определяться как:

$$\frac{1}{|E_C|}\sum_{(v_i,v_j)\in E_C} CLIP(o_i^M, o_i^S)\cdot CLIP(o_j^M, o_j^S)\cdot P\big(d(o_i^M, o_j^M), d(o_i^S, o_j^S), \sigma d\big), \qquad (1)$$

где $CLIP$ – выделение векторов объектов (признаков) по их визуальному образу I и расчет косинусного расстояния между этими векторами, d – взятие евклидового расстояния между положениями p объектов, а P – норма сравнения расстояний с учетом погрешности его определения σd:

$$P(a,b,c) = e^{\frac{1}{2}\left(\frac{a-b}{c}\right)^2}. \qquad (2)$$

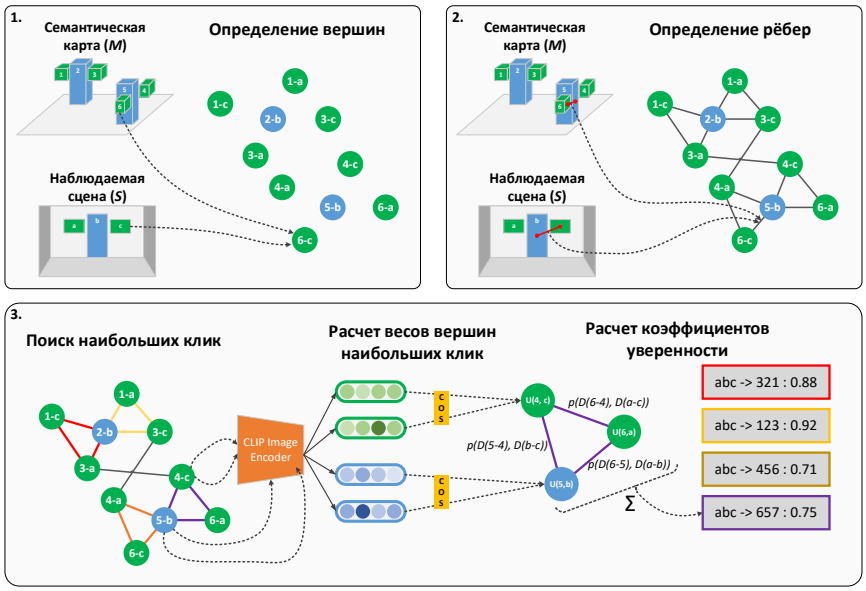


Рисунок 1 — Схема модифицированного метода распознавания сцены на основе поиска наибольшей клики

Такая норма (1) принимает значения в диапазоне 0-1 и отражает как визуальное, так и геометрическое сходство объектов, найденных в решении. Схема модифицированного метода представлена ниже (Рисунок 1).

Метод на основе поиска изоморфного подграфа

В отличие от предыдущего, данный метод строит граф для каждого из множеств *S* и *M*, помечая вершины как объекты, ставя им в соответствие класс объекта *c*. Граф *S* является полносвязным и каждому ребру в соответствие ставится расстояние между объектами, а на графе *M* добавляются только те рёбра, чьё расстояние между объектами не превосходит некого порога. Данный порог может быть выбран на основе характеристик сенсора, по которому определяется положение объектов, или на основе наибольшего расстояния в множестве *S*. Когда графы построены, предлагается воспользоваться алгоритмами поиска изоморфного подграфа из семейства VF [12], [13]. Особенность данного семейства алгоритмов в том, что что они позволяют к базовым условиям изоморфизма добавлять произвольные условия соответствия вершин и рёбер. В данном подходе будет потребовано соответствие классов объектов *c*, которые сопоставлены вершинам, а для рёбер, которым в соответствие поставлены расстояния *d*, будет добавлено условие удовлетворения заданному порога по метрике (2). После применения алгоритма поиска изоморфного подграфа определяются соответствия между множествами *S* и *M*. Для каждого такого соответствия *f* рассчитывается коэффициент уверенности подобный (1), где E_S множество рёбер графа, построенного по множеству *S*:

$$\frac{1}{|E_S|}\sum_{(o_i,o_j)\in E_S} CLIP(f(o_i^S), o_i^S)\cdot CLIP(f(o_j^S), o_j^S)\cdot P\left(d\left(f(o_i^S), f(o_j^S)\right), d(o_i^S, o_j^S), \sigma d\right). \quad (3)$$

Общая схема предложенного метода изображена ниже (Рисунок 2).

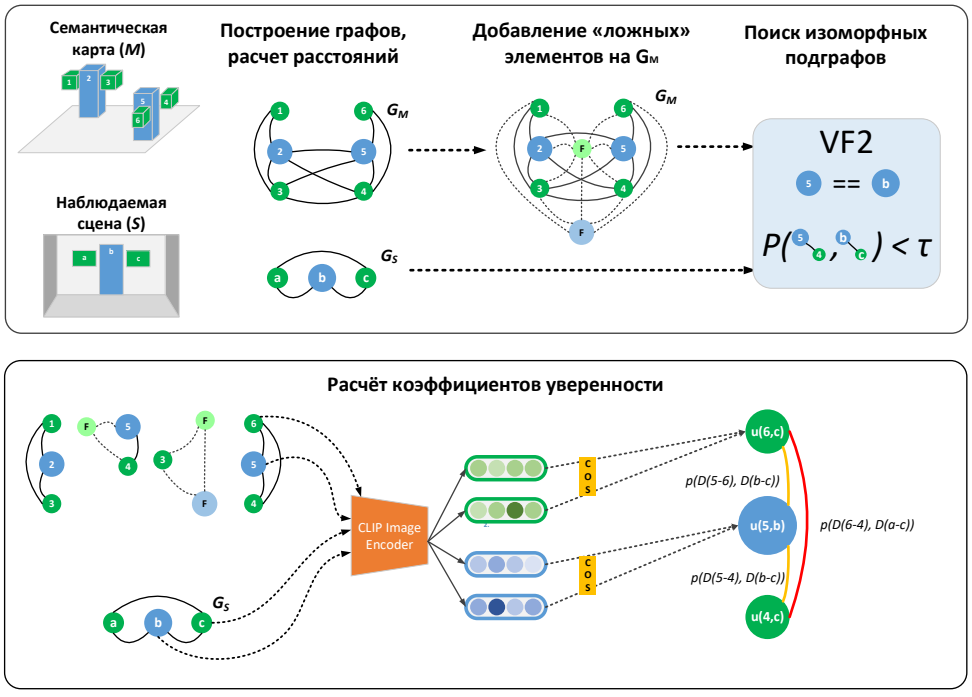


Рисунок 2 — Схема модифицированного метода распознавания сцены на основе поиска изоморфного подграфа

На схеме (Рисунок 2) указан этап добавления «ложных» вершин и рёбер в граф сцены. Данный подход был приведён в работе [7] и позволяет адаптировать метод к условиям неопределённости, которые нарушают изоморфизм. В формуле (3) значения функций *CLIP* и *P* (2) выбираются равными нулю, если среди их аргументов присутствует хоть один ложный элемент. Такой подход позволяет понизить коэффициент уверенности (3) для сцен, содержащих ложные объекты, однако позволяет находить гипотезы в случае входных данных, нарушающих изоморфизм.

Эксперименты

Данные

Для оценки точности предложенных модификаций методов требуются реальные данные или данные, полученные из фотореалистичных симуляторов. К сожалению, несмотря на то, что задача распознавания сцен активно исследуется в течении последних лет, на сегодняшний день не было найдено какого-то стандартного набора данных для её тестирования. Авторам приходится либо собирать свои данные, либо модифицировать открытые наборы из смежных задач. Т.к. никакие из этих работ также не были выложены в открытый доступ,

было принято решение модифицировать открытый набор данных KITTI-360 [14]. Данный набор используется для отработки задач картирования и локализации, а также задач технического зрения. В наборе имеется девять проездов автомобиля, снабжённого сенсорами по городской среде. Каждый набор включает в себя «сырые» данные камеры, лидаров, положения автомобиля, а также 2D и 3D разметку объектов. Однако использовать его для задачи распознавания сцен мешает тот факт, что отсутствует связь между 3D разметкой объектов и 2D сегментацией этих же объектов на кадрах камеры. Был написан скрипт, который восстанавливает это соответствие. Полученные им данные и исходный код доступен онлайн по адресу https://github.com/MoscowskyAnton/scene_recognition_kitti_360. Также набор данных содержит CLIP-признаки, рассчитанные для объектов сцены с учетом их сегментационной маски, дабы исключить влияние перекрывающих их объектов. Для объектов семантической карты CLIP-признаки были получены путём усреднения признаков с каждого кадра, с которого был наблюдаем данный объект.

Оценка качества

Обычно в работах, посвященных визуальной локализации и опирающихся на задачу распознавания сцен, не проводится оценка последнего механизма в отдельности. Авторы предпочитают оценивать финальные результаты задачи локализации, которая помимо распознавания сцен включает в себя и другие задачи. В этой работе было решено провести именно оценку самих методов распознавания сцен. Результат каждого метода есть сопоставление объектов сцены объектам карты. Также, как упоминалось, каждый метод может генерировать несколько ответов, снабжая их числовой оценкой. Для оценки было введено несколько критериев, разными способами оценивающих точность предлагаемых методов.

Критерий degree показывает:

1. долю полностью верно распознанных сцен, при этом имеющих максимальный коэффициент уверенности (1) и (3) – super_true;
2. долю правильно распознанных сцен, но не максимальных по коэффициенту уверенности – has_true;
3. долю сцен без ответа – no_result;
4. долю неправильно распознанных сцен – wrong.

Критерий rate показывает долю верно сопоставленных объектов в ответе с наибольшим коэффициентом уверенности. Критерий score показывает обратную величину к номеру правильно распознанной сцены в общем наборе решений, упорядоченном по коэффициенту уверенности.

Параметры методов

Исследуемые методы имеют ряд настаиваемых параметров, которые напрямую влияют на точность и скорость их работы. Была выполнена предварительная оптимизация исследуемых методов на наборе данных из ста сцен, равномерно распределённых по их размеру (количеству объектов в каждой). Средством optuna проводилась мультиоптимизация по параметру rate и времени исполнения. Оптимизация длилась сто шагов. По форме графиков процесса оптимизации (Рисунок 3) можно сделать вывод, что финальные параметры принадлежат некоторой оптимальной области.

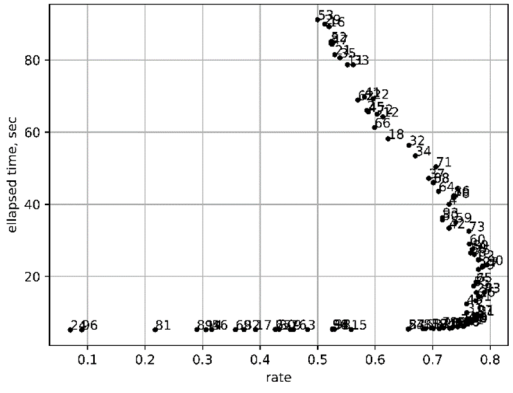


Рисунок 3 — Кривая процесса оптимизации, видна область, в которой достигается минимум по времени и максимум по точности (rate)

Результаты экспериментов

Для каждого проезда из полученного набора данных сравнивались исходные методы на основе поиска изоморфного подграфа (sig) и на основе поиска наибольшей клики (mc+) с расширением, предложенным в [7], а также предложенные в данной работе их модификации, что учитывают визуальное сходство, определяемое с помощью CLIP (sig_clip и mc+_clip). Для каждого заезда определялись критерии degree, rate и score. Также замерялись временные характеристики. Однако стоит заметить, что время исполнения каждого метода было ограничено двумя минутами, если метод не успевал за это время, то его degree выбирался равным no_re-

sult, a score и rate равными нулю. Ограничение на время выбрано как из соображений практического применения данных методов, так и ввиду большого объемов данных, требующих обработки. Для каждого прогона были построены графики для исследуемых критериев (Рисунок 4). Эксперименты проводились на ПК с процессором AMD Ryzen 7 2700X Eight-Core 3.70 GHz.

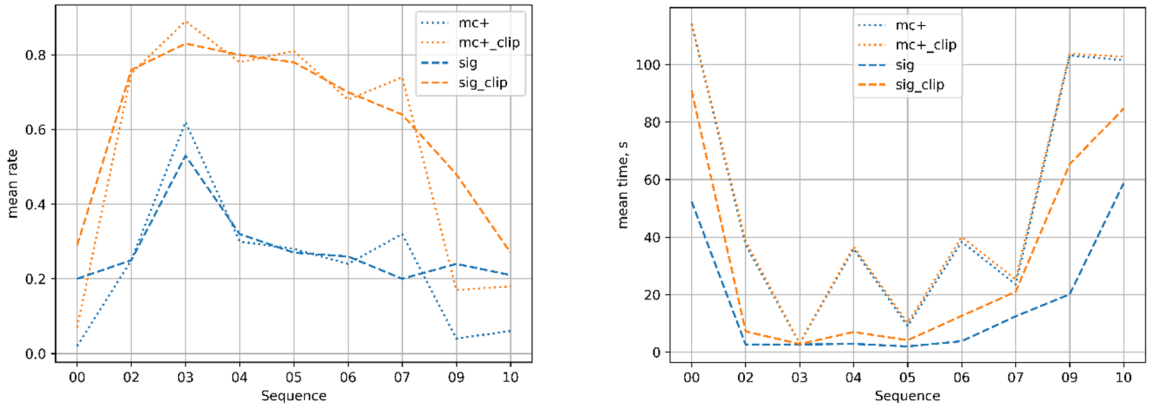


Рисунок 4 — Графики для исследуемых параметров (rate и времени) для каждого метода и всех прогонов из набора данных

Эти же параметры вместе с показателями ошибок приведены в численном виде (Таблица 1), знаком σ отмечено среднеквадратичное отклонение исследуемой величины.

Таблица 1 — Абсолютные результаты исследуемых методов

Метод	№ прогона (размер карты)	Degree	Rate	σRate	Score	σScore	t, c	σt, c
mc+	00 (1737)	0,02/0,08/0,88/0,02	0,02	0,14	0,02	0,13	114,07	21,27
mc+_clip		0,06/0,04/0,89/**0,01**	0,07	0,25	0,07	0,24	114,24	21,03
sig		0,11/0,37/0,35/0,16	0,2	0,37	0,15	0,32	**52,38**	49,77
sig_clip		**0,21**/0,17/0,57/0,06	**0,29**	0,43	**0,24**	0,4	90,95	35,99
mc+	02 (1101)	0,19/0,68/0,04/0,08	0,25	0,41	0,27	0,38	37,32	31,62
mc+_clip		**0,69**/0,21/0,05/0,05	0,75	0,41	0,74	0,4	38,69	32,35
sig		0,20/0,68/0,04/0,08	0,25	0,41	0,27	0,38	**2,67**	10,23
sig_clip		0,68/0,27/0,01/**0,04**	**0,76**	0,39	**0,75**	0,38	7,23	9,89
mc+	03 (128)	0,48/0,41/0,00/0,11	0,62	0,43	0,57	0,43	3,03	10,44
mc+_clip		**0,78**/0,14/0,00/0,09	**0,89**	0,24	**0,82**	0,35	3,1	7,37
sig		0,40/0,39/0,11/0,10	0,53	0,45	0,49	0,44	**2,67**	15,33
sig_clip		0,71/0,14/0,06/**0,08**	0,83	0,32	0,76	0,4	2,81	15,36
mc+	04 (1000)	0,23/0,65/0,05/0,08	0,3	0,43	0,31	0,4	35,93	32,37
mc+_clip		**0,70**/0,19/0,05/0,06	0,78	0,39	**0,76**	0,39	36,69	32,88
sig		0,24/0,65/0,02/0,09	0,32	0,44	0,32	0,4	**2,87**	11,75
sig_clip		0,69/0,27/0,00/**0,04**	**0,8**	0,36	**0,76**	0,37	7	9,86
mc+	05 (520)	0,22/0,72/0,00/0,06	0,28	0,43	0,32	0,39	9,11	10,79
mc+_clip		**0,74**/0,21/0,00/0,05	**0,81**	0,37	**0,8**	0,35	10,2	13,46
sig		0,21/0,71/0,02/0,06	0,27	0,42	0,31	0,38	**1,98**	10,76
sig_clip		0,70/0,26/0,01/**0,03**	0,78	0,38	0,78	0,36	4,15	13,62
mc+	06 (1030)	0,19/0,65/0,06/0,10	0,24	0,41	0,25	0,38	38,36	32,47
mc+_clip		**0,61**/0,25/0,07/0,07	0,68	0,44	0,67	0,43	40,03	33,69
sig		0,19/0,67/0,03/0,12	0,26	0,41	0,25	0,38	**3,81**	13,43
sig_clip		**0,61**/0,32/0,03/**0,04**	**0,7**	0,42	**0,68**	0,42	12,6	21,15

Метод	№ прогона (размер карты)	Degree	Rate	σRate	Score	σScore	t, c	σt, c
mc+	07 (476)	0,23/0,54/0,06/0,17	0,32	0,44	0,3	0,41	23,53	32,3
mc+_clip		**0,65**/0,13/0,08/0,14	**0,74**	0,41	**0,69**	0,44	25,32	34,46
sig		0,16/0,50/0,22/0,13	0,2	0,39	0,22	0,36	**12,47**	33,91
sig_clip		0,58/0,17/0,19/**0,06**	0,64	0,46	0,62	0,46	21,02	42,04
mc+	09 (1549)	0,03/0,24/0,71/0,03	0,04	0,18	0,04	0,17	103,18	31,13
mc+_clip		0,15/0,11/0,72/**0,02**	0,17	0,37	0,17	0,36	103,77	30,67
sig		0,14/0,65/0,07/0,14	0,24	0,4	0,2	0,35	**20,11**	30,55
sig_clip		**0,37**/0,30/0,29/0,05	**0,48**	0,46	**0,43**	0,46	65,38	39,8
mc+	10 (1163)	0,05/0,19/0,73/0,04	0,06	0,23	0,06	0,22	101,56	35,2
mc+_clip		0,15/0,08/0,75/**0,02**	0,18	0,37	0,17	0,36	102,77	34,49
sig		0,12/0,31/0,45/0,12	0,21	0,38	0,16	0,33	**58,77**	54,27
sig_clip		**0,20**/0,15/0,62/0,03	**0,27**	0,42	**0,23**	0,4	84,71	47,13

Из полученных результатов (Рисунок 4 и Таблица 1) видно, что предложенные модификации значительно улучшают точность методов по всем из исследуемых параметров. Оба предложенных метода показывают сравнимые друг с другом результаты. Однако можно заметить, что точность методов зависит от размера карты (в количестве объектов) и, вероятно, от её топологии, однако это предстоит еще выяснить в дальнейших исследованиях. Общий прирост по параметру rate и score у метода mc+_clip составил 0.34 и 0.32 соответственно, у метода sig_clip 0.36 и 0.34. По параметрам degree среди верно распознанных сцен (super true) также наблюдается прирост, а в показателе неправильно распознанных сцен (wrong) убывание. Метод mc+_clip показывают незначительный прирост во времени (1.19 секунды), в то время как метод sig_clip имеет значительно больший прирост во времени (13.57 секунды), но при этом остаётся всё еще быстрее метода mc+_clip. Разница в скорости возможно достигается из-за особенностей реализации алгоритмов теории графов, которые были взяты из библиотеки igraph.

Заключение

Были предложены модификации методов распознавания сцен с добавлением информации о визуальном сходстве объектов, полученном с помощью архитектуры CLIP. Для тестирования был модифицирован набор данных KITTI-360 под специфику задачи распознавания сцен и выложен в открытый доступ. Разработанные методы показали увеличение точности по сравнению с оригинальными подходами в среднем на 34%, сохраняя время работы методов на приемлемом уровне. Стоит также отметить, что данный подход требует расчёта CLIP-признаков на этапе картирования, что не позволяет использовать готовые карты без этих данных. Следующим шагом исследования будет сочетание данного подхода с подходами лидарной локализации, для проверки выдвинутой гипотезы, что первичный анализ на уровне семантики позволит увеличить как точность, так и быстродействие лидарных подходов.

Литература

1. H. Yin et al., «A Survey on Global LiDAR Localization: Challenges, Advances and Open Problems», Int. J. Comput. Vis., vol. 132, no. 8, pp. 3139–3171, Aug. 2024, doi: 10.1007/s11263-024-02019-5.

2. A. Gawel, C. Del Don, R. Siegwart, J. Nieto, and C. Cadena, «X-View: Graph-Based Semantic Multi-View Localization», Sep. 2017, [Online]. Available: http://arxiv.org/abs/1709.09905.

3. Y. Liu, Y. Petillot, D. Lane, and S. Wang, «Global Localization with Object-Level Semantics and Topology», in 2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA), IEEE, May 2019, pp. 4909–4915. doi: 10.1109/ICRA.2019.8794475.

4. J. Ankenbauer, P. C. Lusk, A. Thomas, and J. P. How, «Global Localization in Unstructured Environments using Semantic Object Maps Built from Various Viewpoints», Mar. 2023, [Online]. Available: http://arxiv.org/abs/2303.04658.

5. M. Shaheer, J. A. Millan-Romera, H. Bavle, J. L. Sanchez-Lopez, J. Civera, and H. Voos, «Graph-based Global Robot Localization Informing Situational Graphs with Architectural Graphs», Mar. 2023, doi: https://doi.org/10.48550/arXiv.2303.02076.

6. А. Д. Московский, «Распознавание сцен для задачи глобальной локализации робота», in Труды 34-й Международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника», СПб., 2023, pp. 267–274.

7. А. Д. Московский, «Распознавание сцен для задач локализации мобильного робота в условиях неопределённости», Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте. Сборник научных трудов XII Международной научно_практической конференции (ИММВ-2024, Коломна, 14-17 мая 2024 г.). В 2-х томах, Коломна: Универсум, 2024, pp. 255–266.

8. K. Ueki, «Survey of Visual-Semantic Embedding Methods for Zero-Shot Image Retrieval», May 2021, [Online]. Available: http://arxiv.org/abs/2105.07391.

9. A. Radford et al., «Learning Transferable Visual Models From Natural Language Supervision», Feb. 2021, [Online]. Available: http://arxiv.org/abs/2103.00020.

10. R. Mirjalili, M. Krawez, and W. Burgard, «FM-Loc: Using Foundation Models for Improved Vision-based Localization», Apr. 2023, [Online]. Available: http://arxiv.org/abs/2304.07058.

11. S. Matsuzaki et al., «CLIP-Loc: Multi-modal Landmark Association for Global Localization in Object-based Maps», Feb. 2024, [Online]. Available: http://arxiv.org/abs/2402.06092.

12. A. Jüttner and P. Madarasi, «VF2++—An improved subgraph isomorphism algorithm», Discret. Appl. Math., vol. 242, pp. 69–81, Jun. 2018, doi: 10.1016/j.dam.2018.02.018.

13. V. Carletti, P. Foggia, A. Greco, M. Vento, and V. Vigilante, «VF3-Light: A lightweight subgraph isomorphism algorithm and its experimental evaluation», Pattern Recognit. Lett., vol. 125, pp. 591–596, Jul. 2019, doi: 10.1016/j.patrec.2019.07.001.

14. Y. Liao, J. Xie, and A. Geiger, «KITTI-360: A Novel Dataset and Benchmarks for Urban Scene Understanding in 2D and 3D», Sep. 2021, [Online]. Available: http://arxiv.org/abs/2109.13410.

Информация об авторе

Московский Антон Дмитриевич, начальник группы «системы управления» лаборатории робототехники, Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт»), Россия, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1, moscowskyad@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-6546-8697

Перспективы использования виртуальной среды для первичного тестирования технологий ИИ и алгоритмов автономного управления робототехнических комплексов различного базирования

М.Е. Данилин, О.П. Меньшиков, И.И. Инин ✉, К.Р. Ахтямов, К.Н. Юсупова
Общество с ограниченной ответственностью «АВАНТИ-СОФТ» (ООО «АВАНТИ-СОФТ»), г. Иннополис, Республика Татарстан, Россия, fiz.fill@mail.ru

Аннотация
В статье рассматриваются перспективы использования виртуальных сред для первичного тестирования технологий искусственного интеллекта (ИИ) и алгоритмов автономного управления робототехническими комплексами. Показаны преимущества применения симуляторов, такие как ускорение разработки, снижение затрат, минимизация рисков и гибкость тестирования в разнообразных условиях. Представлен пример симулятора, разработанного на основе Unreal Engine, AirSim и ArduPilot, с поддержкой интеграции с реальными системами управления полностью совместимые с поставляемым оборудованием компании. Приведены примеры использования симулятора. Описано применение предобученной модели YOLO для распознавания объектов с видеопотока с виртуальной камеры и генерации синтетических данных. Отмечено значение виртуальной среды для тренировки моделей ИИ и первичного тестирования алгоритмов.

Ключевые слова
Виртуальная среда, технологии искусственного интеллекта, автономное управление, симулятор, тестирование алгоритмов, генерация синтетических данных, виртуальное окружение.

Prospects for the use of virtual environments for initial testing of AI technologies and autonomous control algorithms for robotic systems of various types

Maksim E. Danilin, Oleg P. Menshikov, Igor I. Inin ✉, Kamil R. Akhtyamov, Christina N. Yusupova
«Avanti-Soft» LLC, Innopolis, Republic of Tatarstan, Russia, fiz.fill@mail.ru

Abstract
The article discusses the prospects of using virtual environments for initial testing of artificial intelligence (AI) technologies and autonomous control algorithms of robotic systems. The benefits of simulators, such as accelerated development, cost reduction, risk minimization, and flexible testing in various conditions, are highlighted. An example of a simulator built with Unreal Engine, AirSim, and ArduPilot, supporting integration with real control systems, is provided. The application of the YOLO model for object detection and synthetic data generation is described. The importance of virtual environments for training AI models and initial algorithm testing is emphasized.

Key words
Virtual environment, artificial intelligence technologies, autonomous control, simulator, algorithm testing, synthetic data generation, virtual surroundings.

Современный мир переживает бурный рост технологий искусственного интеллекта (ИИ) и робототехники. Робототехнические комплексы различного базирования становятся все более интегрированными в различные сферы человеческой деятельности. Однако разработка и внедрение сложных алгоритмов автономного управления требуют тщательного тестирования и отладки, что влечет за собой увеличение финансовых и временных затрат. В этом контексте виртуальные среды становятся незаменимым инструментом, позволяющим проводить первичное тестирование технологий ИИ и алгоритмов автономного управления без риска для оборудования, людей и окружающей среды.

Использование виртуальных сред позволяет разработчикам моделировать реальные условия эксплуатации систем, тестировать алгоритмы и обучать ИИ в безопасных и контролируемых условиях. Это особенно важно при разработке сложных систем, где ошибки могут привести к поломкам. повреждению оборудования или в сценариях, трудно воспроизводимых в реальном мире.

Одним из наиболее значительных преимуществ использования симуляторов является ускорение процесса разработки. Виртуальная среда позволяет разработчикам быстро тестировать и оптимизировать алгоритмы автономного управления и машинного зрения без необходимости организовывать дорогостоящие реальные испытания. Например, в разработке автономных дронов полевые испытания требуют подготовки площадок,

обеспечения безопасности, а также значительных временных затрат на организацию каждого этапа тестирования. За одну минуту в симуляторе могут пролетать часы или даже дни, которые потребовались бы в реальном мире.

Использование виртуальной среды позволяет тестировать отдельные этапы автономных операций. Например, если нам нужно протестировать часть алгоритма, отвечающую только за фазу взлета или за фазу поиска цели, мы можем изолировать этот этап и проверять его работу. Такой подход позволяет сосредоточиться на отдельных элементах полетного алгоритма и быстро устранять ошибки

Помимо этого, в симуляторе можно одновременно тестировать несколько сценариев и моделей. Например, автономный наземный робот может быть протестирован в различных условиях: городская среда, сельская местность, пересеченная местность. В реальном мире это потребовало бы организации нескольких полигонов, что значительно увеличило бы затраты и время на проведение испытаний.

Использование реального оборудования для тестирования всегда связано с затратами. Например, создание прототипов дронов, покупка сенсоров, камер, процессоров и других компонентов требует значительных финансовых ресурсов. Помимо этого, для проведения реальных испытаний могут потребоваться аренда площадок, найм технического персонала и обеспечение безопасности.

Симуляторы позволяют снизить эти затраты, предоставляя виртуальную среду для тестирования. Виртуальные дроны, роботы или автомобили могут использоваться для отработки алгоритмов и тренировки систем ИИ без необходимости создавать реальные прототипы на ранних этапах разработки. Это особенно важно для стартапов и небольших компаний, которые не могут позволить себе дорогие реальные испытания и создание физических прототипов на каждой стадии разработки.

Из прошлого пункта вытекает и еще один плюс. Использование реального оборудования для тестирования автономных систем всегда сопряжено с определенными рисками. Например, ошибки в алгоритме могут привести к поломке или повреждению дорогих дронов, роботов или других автономных устройств, которые могут существовать лишь в единственном экземпляре. Виртуальная среда, напротив, позволяет проводить тестирование в безопасных условиях, где сбои и ошибки не приведут к поломке оборудования или угрозе для жизни и здоровья людей.

В дополнение к этому, симуляторы позволяют моделировать аварийные ситуации, которые в реальных условиях могли бы оказаться опасными. Например, можно протестировать автономный дрон в условиях отказа системы управления или питания и посмотреть, как алгоритмы справятся с этой ситуацией. Это позволяет выявить слабые места в системе и улучшить надежность перед запуском в реальную эксплуатацию.

Один из наиболее ценных аспектов использования симуляторов заключается в возможности моделировать различные условия окружающей среды. В реальном мире тестирование может ограничиваться лишь определенными сценариями, доступными в данный момент. Например, если требуется протестировать автономный дрон в условиях сильного ветра или дождя, такие условия могут оказаться недоступными в момент тестирования.

Симуляторы позволяют моделировать разнообразные погодные условия, ландшафты и препятствия. Это особенно важно при разработке систем, предназначенных для работы в сложных и экстремальных условиях.

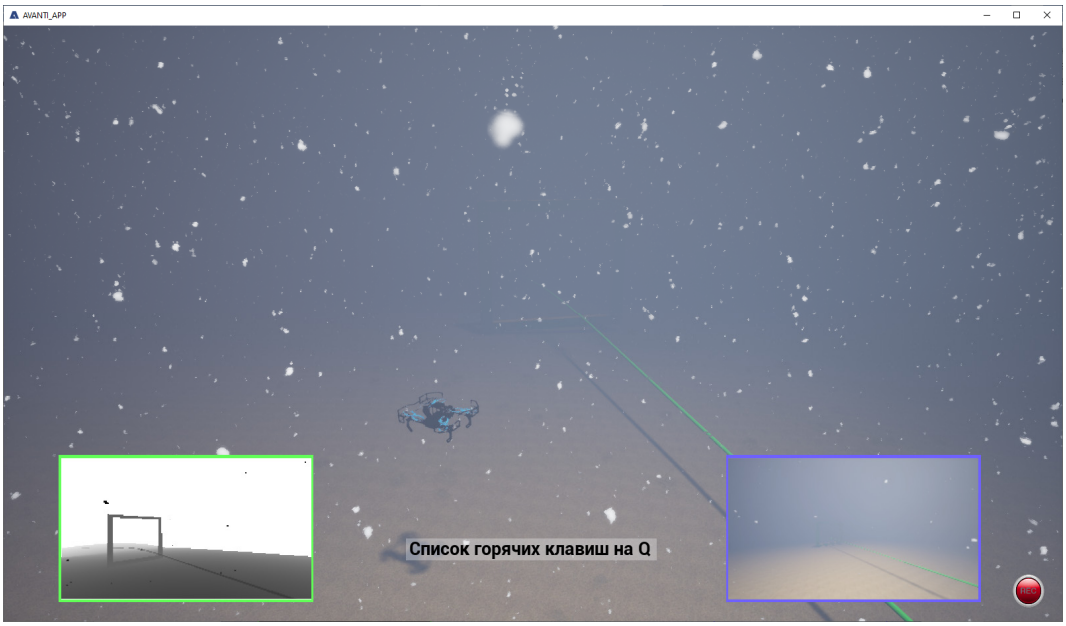


Рисунок 1 — Пример симуляции сложных погодных условий

Виртуальные среды позволяют моделировать не только типичные условия, но и экстремальные сценарии, которые в реальном мире могут быть редки. трудно воспроизводимы или опасны для воспроизведения.

Исходя из перечисленных преимуществ, мы разработали собственный симулятор для тестирования технологий ИИ и алгоритмов автономного управления робототехнических комплексов. Наша цель состояла в том, чтобы создать гибкую и реалистичную виртуальную среду, которая позволит эффективно отрабатывать и улучшать алгоритмы без необходимости проведения дорогостоящих полевых испытаний.

Хотя основной акцент в статье сделан на дронах, важно, что в симуляторе могут использоваться робототехнические комплексы различного базирования.

Используя возможности Unreal Engine, мы создали виртуальные миры с высокой степенью детализации, что позволяет максимально приблизить условия тестирования к реальным.

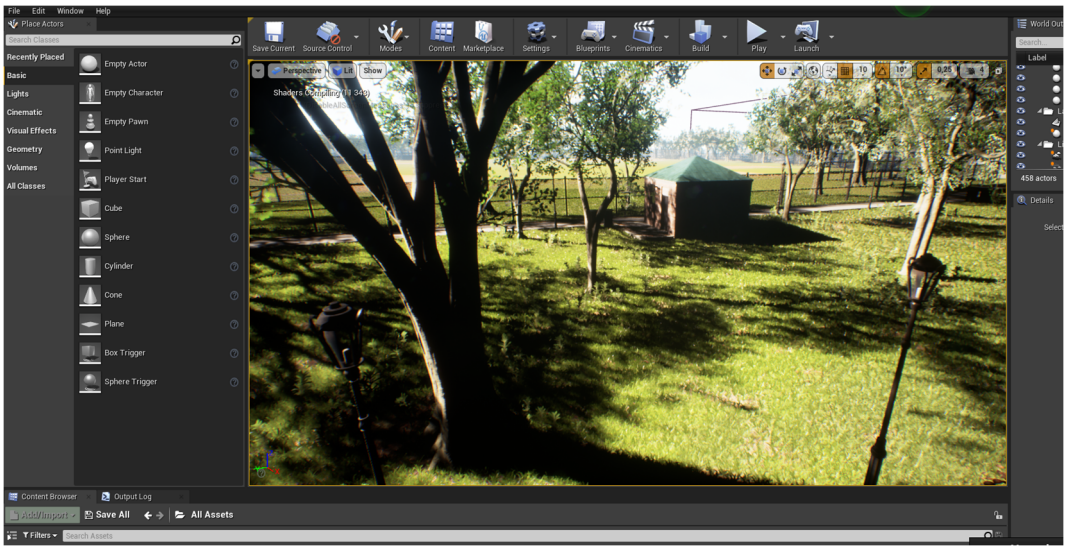


Рисунок 2 — Пример степени детализации сцен доступных в симуляторе

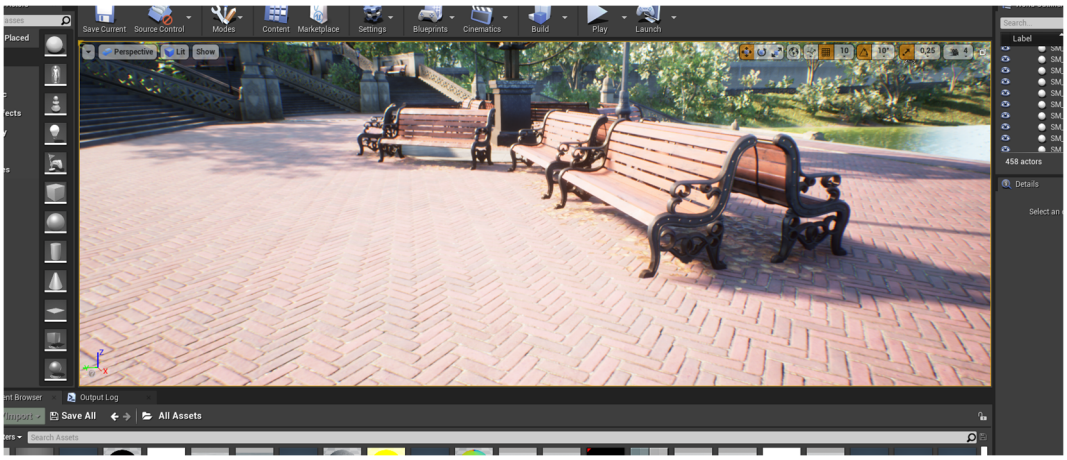


Рисунок 3 — Пример степени детализации сцен доступных в симуляторе

Наш симулятор поддерживает интеграцию с различными платформами управления и полностью совместим с поставляемыми нами дронами, что позволяет использовать, как реальные алгоритмы управления, написанные для реального дрона в симуляции, так и алгоритмы, написанные в виртуальной среде для реального мира.

Мы реализовали возможность подключения к виртуальной камере дрона из симулятора, что позволяет получать видеопоток, аналогичный тому, который поступает с реальной камеры на дроне. Это дает возможность тестировать алгоритмы компьютерного зрения и обработки изображений в реальном времени.

Кроме того, графика близкая к фотореалистичной в совокупности с симулятором позволяет автоматически генерировать и собирать синтетические данные для обучения моделей машинного обучения. Это включает в себя как изображения с разметкой, так и другие типы данных, необходимые для обучения.

Для создания нашей виртуальной среды и разработки симулятора, мы использовали передовые технологии, обеспечивающие реалистичность симуляции и высокую гибкость системы:

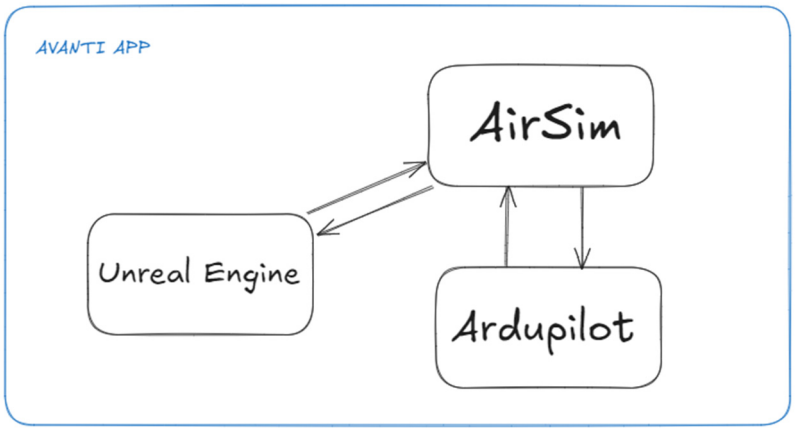


Рисунок 4 — Стек технологий

Unreal Engine – высокопроизводительный игровой движок, отвечающий за реалистичную графику и физику объектов. Благодаря Unreal Engine мы создали детализированные виртуальные миры, позволяющие точно моделировать различные сценарии и условия окружающей среды. Движок также обеспечивает гибкость в настройке параметров и легкость в интеграции новых функций.

AirSim – это модуль, используемый для моделирования физического поведения дронов и других автономных устройств. AirSim взаимодействует с виртуальной средой и позволяет управлять дронами, что дает возможность детально отрабатывать различные сценарии и анализировать, как алгоритмы справляются с теми или иными сложностями, которые могут возникнуть в реальной эксплуатации.

ArduPilot – симуляция физического полетного контроллера с прошивкой ArduPilot, что позволяет управлять дронами и робототехническими системами. В нашем проекте ArduPilot используется для взаимодействия с реальными алгоритмами управления дронов. Это позволяет перенести алгоритмы, разработанные и протестированные в симуляторе, непосредственно на реальные устройства.

Комбинируя эти три технологии, разработчики могут создать реалистичную симуляцию, которая позволяет тестировать автономные системы в условиях, максимально приближенных к реальным, и оценивать их производительность до начала испытаний.

Использование Unreal Engine для создания фотореалистичных сцен и объектов и возможность захватывать видеопоток с виртуальных камер открывает новый простор для распознавания объектов внутри симулятора. С помощью такого подхода разработчики могут использовать виртуальный видеопоток будто он получен с реальной камеры дрона.

Для примера возьмем одну из самых простых и популярных моделей YOLO (You Only Look Once), которая способна детектировать и классифицировать объекты на изображениях в реальном времени. Мы можем использовать предварительно обученные на реальных данных модели для распознавания объектов в симуляторе на видеопотоке, полученном из симулятора и применять их для анализа виртуального видеопотока. Благодаря этому можно тестировать алгоритмы в контролируемой среде и проверять их точность и производительность в условиях, максимально приближенных к реальным.

На скриншоте ниже показан пример работы модели YOLO в симуляторе, где несколько объектов распознаны и обведены рамками. Вероятность распознавания объектов указана рядом с каждой рамкой. Зеленым прямоугольником обводятся объекты, найденные на изображение. Сверху слева от прямоугольника указывается определенный класс объекта и вероятность того, что объект был распознан правильно, выраженная в процентах.

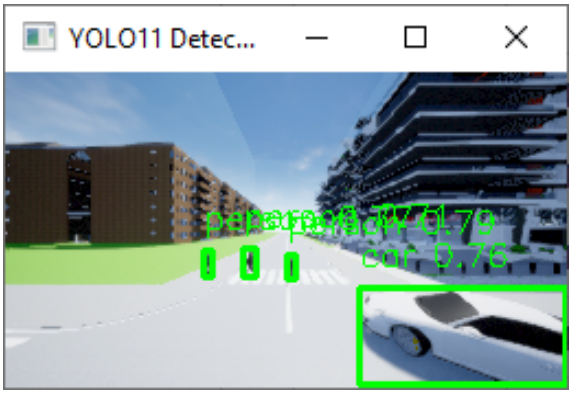


Рисунок 5 — Пример работы модели YOLO в симуляторе

В реальных условиях процесс сбора дата-сета может потребовать значительных ресурсов и человека-часов на постобработку, включая использование физического оборудования, аренду площадок и подготовку сценариев для съемок; аннотации уже готовых фото-видео материалов. Виртуальная среда помогает решить эту с минимальными затратами. Симулятор позволяет в ручном полу-ручном или автоматическом режиме генерировать и собирать синтетические данные, включая изображения, метки объектов и другие параметры, что дает возможность создать большой объем разнообразных данных для тренировки моделей ИИ.

Мы можем имитировать редкие сценарии, которые трудно или дорого воспроизвести в реальном мире, включая различные погодные условия, сложные ландшафты и аварийные ситуации. Виртуальная среда позволяет генерировать обучающие данные быстрее, чем это возможно в реальности. В симуляторе легко создавать тысячи изображений с различными метками и параметрами за короткое время. Все ограничивается лишь умениями 3D-художника.

Пару примеров нашего использования симулятора:

Работа с виртуальной средой дала возможность первоначального тестирования алгоритмов автономного управления. Особенно это актуально в условиях обучения. Не всегда разработчик без опыта может предусмотреть критические моменты.

На скриншоте ниже можно увидеть виртуальную трассу с четкой линией, по которой дрон должен следовать. Симулятор позволил настроить разные виды линий, цвета и уровни освещенности, чтобы оценить, как алгоритмы справляются с изменением условий видимости. Это важно для полетов в условиях реального мира, где линии могут быть разного типа, а освещение – непостоянным.

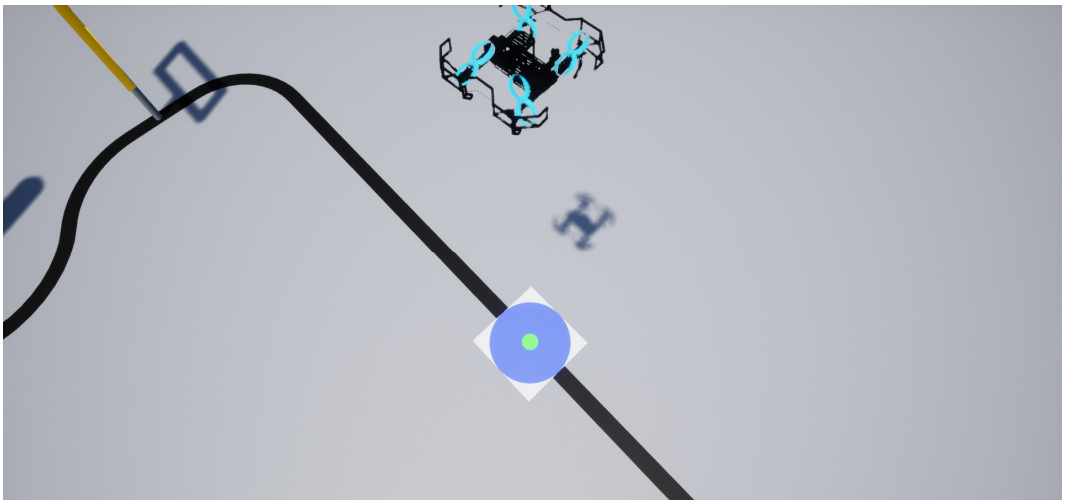


Рисунок 6 — Пример автономного полета по линии из симулятора

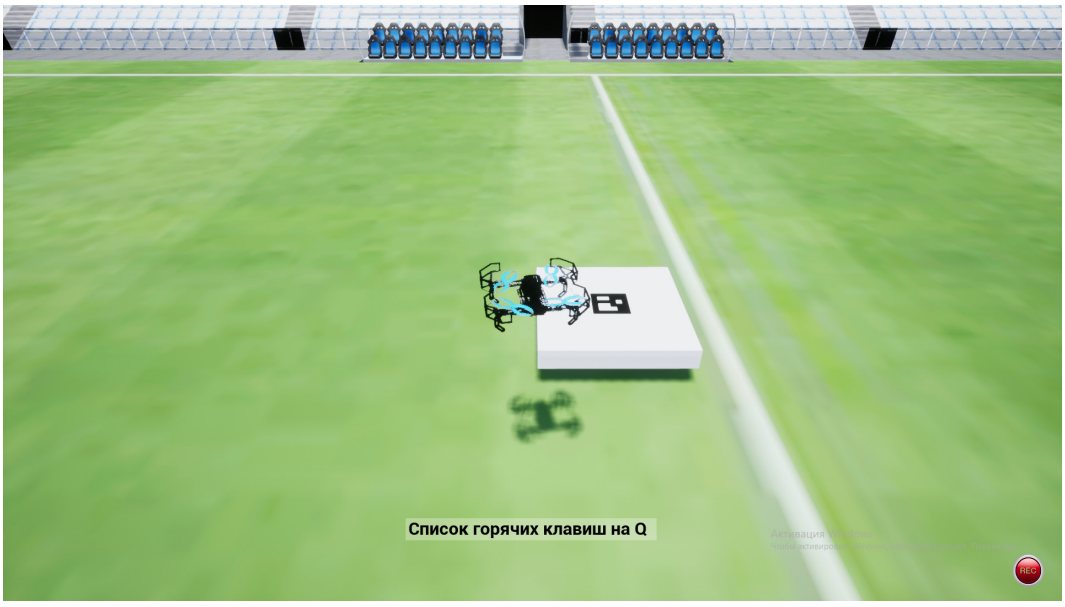


Рисунок 7 — Пример автономного приземления на подвижную платформу

Еще одним примером может быть задача приземления дрона на подвижную платформу, где требуется точное взаимодействие между алгоритмами управления и системами визуального трекинга. В реальных условиях такие маневры сопряжены с высокой степенью риска и требуют четко отлаженных алгоритмов. В симуляторе же мы можем создать платформу с различными размерами и параметрами движения — скорость, направление, угол и ускорение, что позволяет проработать сценарии сложного маневрирования в безопасных условиях.

Использование виртуальных сред для тестирования технологий ИИ и алгоритмов автономного управления представляет собой мощный инструмент, который значительно ускоряет процесс разработки, снижает финансовые и временные затраты, минимизирует риски для оборудования и людей. Возможность моделировать разнообразные сценарии, включая экстремальные условия, позволяет разработчикам выявлять и устранять слабые места алгоритмов еще до реальных испытаний. Применение таких технологий, как Unreal Engine, AirSim и ArduPilot, в совокупности с интеграцией моделей компьютерного зрения, таких как YOLO, открывает новые горизонты для разработки сложных систем и повышения их надежности. Таким образом, виртуальная среда становится важным звеном в процессе создания инновационных робототехнических решений.

Литература

1. Epic Games. Unreal Engine Documentation. [Электронный ресурс]. URL: https://dev.epicgames.com/documentation/ru-ru/unreal-engine/ (дата обращения: 27.08.2024).
2. Microsoft. AirSim: Open Source Simulator for Autonomous Vehicles Built on Unreal Engine / GitHub. [Электронный ресурс]. URL: https://github.com/microsoft/AirSim (дата обращения: 27.08.2024).
3. Yolo / GitHub. [Электронный ресурс]. URL: https://github.com/ultralytics/ultralytics (дата обращения: 20.10.2024).

Информация об авторах

Данилин Максим Евгеньевич, директор, общество с ограниченной ответственностью «АВАНТИ-СОФТ» (ООО «АВАНТИ-СОФТ»), Россия, 420500, Республика Татарстан, г. Иннополис, ул. Университетская, д. 7, пом. 602, а/я № 16, danilin.m@avgr.tech

Меньшиков Олег Павлович, начальник методического центра, ООО «АВАНТИ-СОФТ», Россия, 420500, Республика Татарстан, г. Иннополис, ул. Университетская, д. 7, пом. 602, а/я № 16, metod@avgr.tech

Юсупова Кристина Николаевна, заместитель начальника методического центра, ООО «АВАНТИ-СОФТ», Россия, 420500, Республика Татарстан, г. Иннополис, ул. Университетская, д. 7, пом. 602, а/я № 16, metod@avgr.tech

Инин Игорь Игоревич, начальник отдела передового программирования и информационных систем, ООО «АВАНТИ-СОФТ», Россия, 420500, Республика Татарстан, г. Иннополис, ул. Университетская, д. 7, пом. 602, а/я № 16, fiz.fill@mail.ru

Ахтямов Камиль Рашитович, программист, ООО «АВАНТИ-СОФТ», Россия, 420500, Республика Татарстан, г. Иннополис, ул. Университетская, д. 7, пом. 602, а/я № 16, ahtyamovgk@gmail.com

Гибридный алгоритм распознавания объекта в системе компьютерного зрения

С.О. Власов, А.А. Богуславский, С.М. Соколов
Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН (ИПМ им. М.В. Келдыша РАН), Москва, Россия, sergvlas25@yandex.ru, anbg74@mail.ru, sokolsm@list.ru

Аннотация
В работе рассматривается задача распознавания антропогенного объекта на видеопоследовательностях с использованием комбинированного (гибридного) алгоритма, объединяющего метод традиционного компьютерного зрения поиска особых точек и нейросетевой подход. Выполнялся поиск особых точек в областях исходного изображения, предположительно содержащих объект интереса на основе применения сверточной нейронной сети и последующее их сопоставление с эталонными фрагментами детектором особых точек. Проведена серия вычислительных экспериментов с оценкой эффективности предложенного алгоритма по точности и времени исполнения.

Ключевые слова
Системы компьютерного зрения, обнаружение объектов на изображении, гибридный алгоритм.

Hybrid algorithm for object recognition in computer vision system

Sergey O. Vlasov, Andrey A. Boguslavsky, Sergey M. Sokolov
Keldysh Institute of Applied Mathematics, Moscow, Russia, sergvlas25@yandex.ru, anbg74@mail.ru, sokolsm@list.ru

Abstract
The paper considers the problem of recognizing a man-made object in video sequences using a combined (hybrid) algorithm that combines the traditional computer vision method of searching for key points and a neural network approach. The search for key points in areas of the original image that presumably contain the object of interest was performed using a convolutional neural network and their subsequent comparison with reference fragments by a key point detector. A series of computational experiments were conducted to evaluate the effectiveness of the proposed algorithm in terms of accuracy and execution time.

Key words
Computer vision systems, object detection in images, hybrid algorithm.

Введение

В настоящее время количество и разнообразие задач в части обнаружения и классификации объектов на изображениях с помощью компьютерного зрения увеличивается. Одновременно с этим возрастают требования к точности и быстродействию. Требование высокой надежности при обработке порядка десятков кадров в секунду на универсальном компьютере в системах реального времени приводит к необходимости разработки новых методов и алгоритмов распознавания объектов на изображениях.

Одним из направлений повышения качества работы систем реального времени является разработка гибридных алгоритмов обнаружения и классификации объектов на изображениях, представляющих из себя комбинацию различных методов обнаружения и распознавания объектов. Задачей таких алгоритмов является компенсация недостатков применения конкретных методов по отдельности и повышение эффективности системы при их совместном использовании.

Данное направление активно развивается в настоящее время. Исследуется эффективность построения дескрипторов в структуру, подобную глубоким нейронным сетям [1], рассматривается совместное применений нейронных сетей и других методов компьютерного зрения [2], исследуется возможность разбиения исходного изображения на отдельные области с последующим распознаванием нейронной сетью фрагментов, содержащие не только фон [3], реализуются комбинированные алгоритмы, представляющие собой комбинацию детектора объектов интереса, алгоритма выделения движения и функции слежения [4]. Проводится анализ и оценка алгоритмов распознавания и сопровождения подвижных объектов в режиме реального времени с последующим построением алгоритмического обеспечения для решения данной задачи [5].

Достоинством сверточных искусственных нейронных сетей является возможность распознавания различных объектов на сложном фоне. Известно решение новых задач с помощью данного направления в компьютерном зрении [6]. Подобные же системы применяются в системах реального времени [7], предлагаются различные модификации существующих нейросетевых архитектур [8]. Однако данный метод, особенно при использовании быстродействующих архитектур с малой затратой ресурсов, может приводить к возникновению

ложных обнаружений или к пропускам объекта интереса на изображении. Нейронные сети высокой точности распознавания требуют больших вычислительных мощностей технической системы и не всегда выполняют требования по обработке изображений в реальном времени.

В то же время классические методы поиска особых точек и вычислители дескрипторов, описанные в монографии [9], позволяют обнаруживать и сопоставлять объекты на малых фрагментах изображений за относительно малое время.

В данной работе рассматривается использование алгоритма, представляющего из себя комбинацию нейросетевого и классического методов распознавания объектов на изображениях.

Постановка задачи

Общая схема предложенного алгоритма обнаружения объектов состоит в следующем (рис. 1):

– на вход алгоритма поступает изображение, на котором может присутствовать как объект интереса, так и объекты, не являющиеся целью поиска;
– выполняется поиск объектов интереса с использованием технологии сверточных нейронных сетей;
– выделяются области изображения (фрагменты), предположительно содержащие интересующий объект;
– на каждом фрагменте выполняется поиск особых точек;
– выполняется сопоставление найденных особых точек с примерами «эталонных» наборов таких точек для объекта интереса, отобранных предварительно;
– на основе проведенного сравнения подтверждается или отвергается предположение о наличии объекта интереса в данной области;
– вывод полученных результатов.

Рисунок 1 — Структура реализованного алгоритма

Выбор архитектур сверточных нейронных сетей и алгоритма поиска особых точек

Для решения задачи распознавания объектов на изображении рассматривались архитектуры искусственных нейронных сетей, представленных в «зоопарке моделей» открытой библиотеки Tensorflow2 [10].

На основе представленных на сайте данных о скорости и точности работы сверточных нейронных сетей, а также проведенных предварительных оценок их производительности было определено, что часть архитектур выделяется низкой точностью при высокой скорости работы. В то же время сети, характеризующиеся наибольшим значением точности обнаружения и классификации объектов, выполняют обработку изображений за относительно большой промежуток времени.

Отметим, что поставленную задачу предполагается решать в масштабе реального времени, что накладывает временные ограничения на скорость работы сверточной нейронной сети и реализованного алгоритма в целом. На основе проведенного анализа для проведения последующих расчетов применялись сверточные нейронные сети следующих архитектур:

– EfficientDet: семейство моделей, использующих метод сложного масштабирования для оптимизации размера модели и вычислительных затрат при сохранении высокой производительности, основой которых является нейронная сеть EfficientNet. Общая архитектура данных нейронных сетей в значительной степени соответствует одноступенчатым детекторам. Подробное описание принципа работы и строения семейства сверточных нейронных сетей EfficientDet, а также сравнение результатов работы предложенных архитектур с другими архитектурами проведено в работе [11]. Данная архитектура уже активно используется при разработке алгоритмов для решения различных прикладных задач [12, 13], рассматривается возможность её применения в комбинации с другими методами [3], в том числе в задачах реального времени [14].

– Centernet_resnet50_fpn: нейронная сеть, подход работы которой заключается в определении центральной точки объектов и их размеров для повышения эффективности проводимых вычислений. Для улучшения возможности обнаружения объектов различного масштаба используется архитектура FPN. Подробное описание принципа работы нейронной сети CenterNet, её отличия от других архитектур, используемых для распознавания объектов на изображениях представлено в [15], а пример её комбинирования с другими методами в [16]. Применение данной модели для решения задач с ограниченным временем обработки показано в работах [7, 17].

– SSD_mobilenet: данный детектор использует одну нейронную сеть для одновременной классификации объектов и смещений нескольких ограничивающих рамок различных размеров и соотношений сторон, выделяется своей скоростью и эффективностью, сохраняя при этом конкурентоспособную точность. Используется в том числе для решения задач, в которых скорость имеет решающее значение для эффективной обработки

данных на устройствах с малой вычислительной мощностью. Решение различных задач с применением архитектуры SSD и сравнение с другими алгоритмами проводится в работах [18, 19].

Особые точки представляют собой небольшие фрагменты изображения с высокой плотностью информации о том, что на нем изображено. Они позволяют перейти от пиксельного представления изображения к более компактному.

Одним из подходов традиционного компьютерного зрения в части сопоставления объектов являются детекторы особых точек. Данный метод позволяет обнаружить на различных изображениях особые точки расположенных объектов, а затем по количеству совпадений сделать заключение о наличии объекта в той или иной области обрабатываемого изображения. В настоящее время существует множество детекторов обнаружения особых точек, различающихся скоростью работы, мощностью, инвариантностью относительно вращений, масштабирования, а иногда и малых аффинных преобразований, и методов их сопоставления [9].

При выполнении данной работы предварительно выполнялась оценка скорости и точности работы таких детекторов особых точек, как FAST, SIFT, SURF и ORB [9].

В решаемой задаче важную роль играет быстродействие детектора особых точек. По этой причине в данной работе отдается предпочтение детектору особых точек ORB, который был разработан как более быстрая альтернатива SIFT или SURF. Данный детектор похож на FAST, но используемый дескриптор основан на BRIEF и дополнен вычислением ориентации, которая придает признакам ORB инвариантность относительно вращения.

Результаты экспериментов

Для тестирования предложенного гибридного алгоритма набор данных был взят из открытого источника [20] и размечен с использованием инструментария [21]. Этот набор данных содержит три видеофрагмента, содержащих малый антропогенный движущийся объект типа «БЛА» на естественном фоне. Образ данного объекта не содержит характерных прямолинейных признаков, но в достаточной степени описывается точечными признаками. Часть обрабатываемых изображений содержат также объекты, изменяющие свое положение, но не представляющие интереса.

Для всех трех рассматриваемых в данной работе архитектур сверточных нейронных сетей предварительно выполнялось обучение и оценка точности работы. Пример обнаружения объекта интереса обученной нейронной сетью на сложном фоне представлен на рис. 2. Обучение проводилось на одинаковом наборе данных: все обучающие и тестовые изображения брались из одного видеофрагмента, число обучающих изображений – 2063, тестовых – 365. Обучение проводилось с использованием видеоадаптера NVIDIA GeForce GTX 1650 SUPER.

Рисунок 2 — Пример обнаружения объекта нейронной сетью на сложном фоне

Недостатком нейросетевого метода является возможное возникновение ложных распознаваний (рис. 3). Для снижения числа ошибок в данной работе выполнялась последующая проверка правильности классификации в областях возможного расположения объектов методом поиска и сопоставления особых точек.

Предварительно для оценки возможности обнаружения и распознавания объекта интереса на исходных изображениях к ним был применен детектор ORB. Пример полученных результатов, показывающий, что обнаруженные точки присутствуют на объекте интереса, представлен на рисунке 4. Найденные особые точки выделены круговыми маркерами.

Рисунок 3 — Примеры корректного (справа) и некорректного (слева сверху) обнаружения объекта интереса нейронной сетью

Рисунок 4 — Пример работы детектора особых точек ORB на изображении, содержащем объект интереса

Из первого видеофрагмента было отобрано пять изображений, содержащих объект интереса в разных ракурсах. Данные изображения были использованы как эталонные образцы для сравнения особых точек с фрагментами возможного расположения объекта интереса, предварительно обнаруженными нейронными сетями. Был определен диапазон количества особых точек, достаточного для сопоставления двух объектов на фрагментах. Данные изображения с отмеченными зеленым особыми точками представлены на рисунке 5.

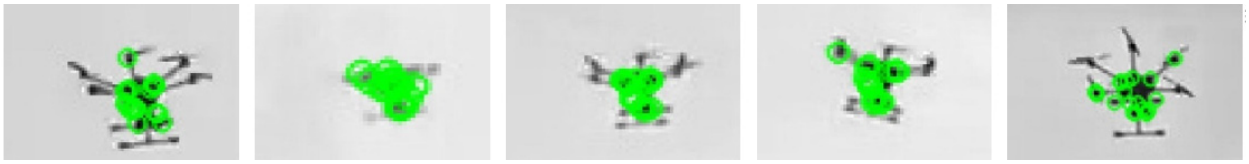
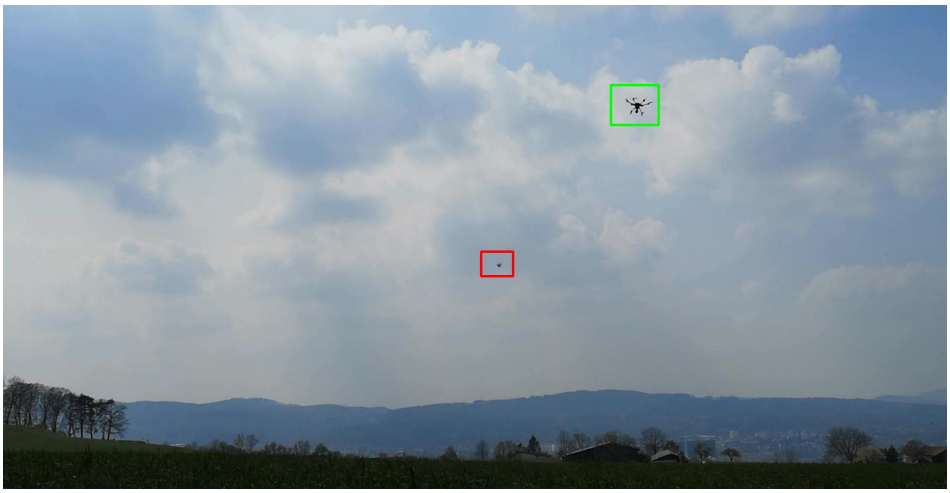


Рисунок 5 — Эталонные изображения с выделенными особыми точками

В рамках проведенной работы была выполнена серия вычислительных экспериментов на тестовых видеопоследовательностях с размером изображений 1920x1080 пикселей применительно к распознаванию объекта интереса размерами от 0,02% до 0,4% от площади кадра. Образ объекта интереса на видеопоследовательности изменяется в результате смещения и поворота объекта. На части кадров обрабатываемых видеопоследовательностей объект интереса отсутствовал, перекрывался фоном или присутствовали другие объекты.

Каждый участок изображения, на котором с вероятностью более 30% нейронная сеть обнаруживала объект интереса, подавался на сопоставление с пятью изображениями – «эталонами» детектора особых точек ORB. Количество искомых точек на обоих изображениях было принято равным 40. При наличии совпадений с одним из фрагментов менее заданного числа особых точек (варьировались значения от 15 до 25) принимается решение о ложном распознавании и область выделяется красным прямоугольником, при большем количестве

подтверждается наличие объекта интереса и фрагмент выделается зеленым. Пример изображений с успешным применением предложенного гибридного алгоритма представлен на рисунке 6.



а)

б)

Рисунок 6 — Результаты работы гибридного алгоритма: а) определено одно ложное распознавание; б) определены два ложных распознавания

В таблице 1 представлены полученные результаты по влиянию порогового значений числа соответствующих эталонным фрагментам особых точек для трех видеофрагментов при обработке изображений различными архитектурами сверточных нейронных сетей. Вычисления проводились на процессоре Intel(R) Core(TM) i5-10400F CPU @ 2.90GHz. Из полученных результатов видно, что увеличение порогового значения приводит к уменьшению числа ложных распознаваний, и увеличению количества областей изображений, верно обработанных нейросетевым методом, но ошибочно отброшенных детектором особых точек. В зависимости от поставленной задачи, типа объекта и сложности фона необходимо предварительно определять необходимое значение порога.

В данной таблице приняты следующие обозначения:

* – процентное соотношение относительно количества кадров с объектом интереса;

*1 – процентное уменьшение количества ложных срабатываний детектора;

Было ложн. обнар. – число объектов, распознанных нейронной сетью как объект интереса, не являющихся таковыми без уточнения методом сопоставления особых точек;

Стало ложн. обнар. – число объектов, распознанных нейронной сетью как объект интереса, не являющихся таковыми с уточнением методом сопоставления особых точек;

Было необнар. – число объектов интереса, не распознанных нейронной сетью как объект интереса, не являющихся таковыми без уточнения методом сопоставления особых точек;

Стало необнар. – число объектов интереса, не распознанных нейронной сетью как объект интереса, не являющихся таковыми с уточнением методом сопоставления особых точек;

Кадров без объекта – количество кадров видеофрагмента, не содержащих объект интереса.

Таблица 1 — Влияние числа соответствующих точек на результат обработки изображений

Нейросетевая Архитектура	Видеопоследовательность и порог по особым точкам	Ложные обнаружения		Не обнаружено объектов		Кадров без объекта
		Было	Стало	Было	Стало	
EfficientDet	1 порог 15 точек	20	1; 95%*1	181; 7%*	185; 7,2%*	1825
	2 порог 25 точек	100	14; 86%*1	125; 3,6%*	133; 3,8%*	1252
	3 порог 25 точек	65	6; 90,7%*1	174; 4,1%*	1080; 25,4%*	75
	3 порог 15 точек	65	33; 49,2%*1	174; 4,1%*	302; 7,1%*	75
	3 порог 20 точек	65	20; 69,2%*1	174; 4,1%*	543;12,8%*	75
Centernet resnet50_fpn	1 порог 15 точек	19	0; 100%*1	5; 0,2%*	19; 0,7%*	1825
	2 порог 15 точек	92	37; 40,2%*1	12; 0,3%*	14; 0,4%*	1252
	2 порог 20 точек	92	21; 59,8%*1	12; 0,3%*	14; 0,4%*	1252
	3 порог 18 точек	20	8; 60%*1	1004; 23,6%*	1044; 24,5%*	75
SSD_mobilenet	1 порог 18 точек	25	3; 88%*1	43; 1,7%*	62; 2,4%*	1825
	2 порог 18 точек	116	30; 74,1%*1	15; 0,4%*	31; 0,9%*	1252
	3 порог 18 точек	1466	706; 51,8%*1	248; 5,8%*	451; 10,6%*	75

С помощью предложенного алгоритма число ложных обнаружений объекта было снижено на 40 – 100% по сравнению с чисто нейросетевым алгоритмом для различных видеопоследовательностей и значений настраиваемых параметров

Для каждого видеофрагмента для различных значений требуемого сопоставления количества особых точек была проведена предварительная оценка временных затрат на выполнение отдельных частей программы. При оценке временных затрат не учитывались вспомогательные операции: преобразование форматов изображений, обработка признаков наличия объектов, настройка вывода изображений, вычисление параметров изображения. Полученные результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2 — Временная оценка предложенного алгоритма

Нейросетевая архитектура	Видеопоследовательность	Время, сек		% от общего	На кадр	Кадров/сек
EfficientDet	1, 4377 кадров	Общее	1565.3	100	0.36	2.8
		ORB	8.3	0.53	0.0019	527
		Нейро	502	32	0.115	8.72
		Сохранение файла	879.4	56.18	0.2	4.98
	2, 4749 кадров	Общее	1772.8	100.00	0.37	2.68
		ORB	12.7	0.72	0.0027	373.94
		Нейро	547.4	30.88	0.12	8.68
		Сохранение файла	992.7	56.00	0.21	4.78
	3, 4332 кадров	Общее	1613.9	100.00	0.37	2.68
		ORB	12.9	0.80	0.0030	335.81
		Нейро	497.2	30.81	0.11	8.71
		Сохранение файла	898.8	55.69	0.21	4.82
Centernet_resnet50_fpn	1, 4377 кадров	Общее	1456.9	100.00	0.33	3.00
		ORB	8.9	0.61	0.0020	491.80
		Нейро	381.8	26.21	0.09	11.46
		Сохранение файла	886.9	60.88	0.20	4.94
	2, 4749 кадров	Общее	1581.5	100.00	0.33	3.00
		ORB	13.1	0.83	0.0028	362.52
		Нейро	414.5	26.21	0.09	11.46
		Сохранение файла	960.7	60.75	0.20	4.94
	3, 4332 кадров	Общее	1480	100.00	0.34	2.93
		ORB	10.1	0.68	0.0023	428.91
		Нейро	374.4	25.30	0.09	11.57

Нейросетевая архитектура	Видеопоследовательность	Время, сек		% от общего	На кадр	Кадров/сек
		Сохранение файла	899.9	60.80	0.21	4.81
SSD_mobilenet	1, 4377 кадров	Общее	1505	100.00	0.34	2.91
		ORB	8.8	0.58	0.0020	497.39
		Нейро	426.7	28.35	0.10	10.26
		Сохранение файла	890.6	59.18	0.20	4.91
	2, 4749 кадров	Общее	1646.5	100.00	0.35	2.88
		ORB	12.7	0.77	0.0027	373.94
		Нейро	403.2	24.49	0.08	11.78
		Сохранение файла	1008.4	61.25	0.21	4.71
	3, 4332 кадров	Общее	1521.7	100.00	0.35	2.85
		ORB	16.2	1.06	0.0037	267.41
		Нейро	383	25.17	0.09	11.31
		Сохранение файла	921.5	60.56	0.21	4.70

Полученные результаты показывают, что по сравнению с нейросетевым методом введение в гибридный алгоритм работы детектора особых точек не оказывает значительного влияния на время обработки изображений, а сохранение файла и дополнительная обработка занимают значительный промежуток общего затраченного времени.

Скорость обработки с учетом загрузки кадра, обработки видео, сохранения полученного изображения и преобразований в одноканальный тип составляет приблизительно 2,6…3,0 кадра/сек.

Скорость проводимых нейронной сетью вычислений составляет приблизительно 8,68…11,78 кадров/сек.

Скорость обработки детектором особых точек и сопоставления с пятью фрагментами составляет приблизительно 267,41…527 кадров/сек.

Выполнение обнаружения и классификации объекта интереса на изображение, а также проверки верности распознавания без сохранения файла (непосредственно расчетов) возможно со скоростью до 7,7 кадров/сек.

Вывод

Было проведено сравнение полученных результатов по скорости и точности работы комбинаций различных типов архитектур сверточных нейронных сетей и методов поиска и сопоставления особых точек.

Отмечается возможность использования предложенного алгоритма в системах реального времени на базе компьютеров универсальной архитектуры, намечаются пути его дальнейшего совершенствования.

Использование детектора особых точек ORB не оказывает значительного влияния на время обработки изображений (в проведенных расчетах не превышало 1% от общего времени обработки изображений с учетом сохранения файлов и преобразований изображений, 4% от общего времени расчетов), в то же время последующая обработка ранее обнаруженных нейросетевым методом объектов снижает число ложных распознаваний на 40…100%.

Использование детектора особых точек ORB не позволяет уменьшить число необнаруженных объектов интереса. Более того, требуется точный подбор числа совпадений количества особых точек с эталонными образами объектов. В проведенных расчетах число необнаруженных объектов могло увеличиваться вплоть до 6 раз при высоких требованиях к соответствию фрагмента эталону.

Алгоритм поиска объектов на отдельных фрагментах изображения детектором особых точек с последующим уточнением нейросетевым методом может уменьшить число нераспознанных объектов. Также следует рассмотреть возможность реализации алгоритма выделения областей скопления особых точек, сопоставленных с эталонами, с последующим поиском объектов нейронной сетью в этом фрагменте.

Литература

1. N. Ardalani, S. Pal, P. Gupta, DeepFlow: A cross-stack pathfinding framework for distributed ai systems, 2022. URL: https://arxiv.org/abs/2211.03309.

2. Taspinar Y., Murat S. Object recognition with hybrid deep learning methods and testing on embedded systems // International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering. – 2020. – Т. 8. – С. 71-77. – DOI: 10.18201/ijisae.2020261587.

3. Varga L. A., Zell A. Tackling the background bias in sparse object detection via cropped windows // Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision Workshops (ICCVW) –2021 – С. 2768-2777.

4. Стротов, В. В. Комбинирование нескольких алгоритмов для увеличения точности обнаружения и локализации пешеходов / В. В. Стротов, П. Е. Жгутов // Труды Международной конференции по компьютерной графике и зрению «Графикон». – 2022. – № 32. – С. 628-635. – DOI 10.20948/graphicon-2022-628-635.

5. Волкова М. А. Алгоритмическое обеспечение обработки сегментированной сенсорной информации для слежения за подвижными объектами в режиме реального времени : специальность 2.3.1 "Системный анализ, управление и обработка информации, статистика" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Волкова Мария Александровна ; ФГБОУ ВО «МИРЭА - Российский технологический университет» – Москва, 2024. – 141 с. – Библиогр.: с. 118–134.
6. Авраменко, В. С. Распознавание объектов беспилотными летательными аппаратами на основе нейронной сети MOBILENET / В. С. Авраменко, Е. С. Чичков // Экстремальная робототехника. – 2024. – № 1(34). – С. 261-266.
7. Xu Z., Hrustic E., Vivet D. CenterNet heatmap propagation for real-time video object detection // Proceedings of the computer vision (ECCV). – Springer, Cham, 2020. – С. 220-234. – DOI:10.1007/978-3-030-58595-2_14.
8. Береснев, А. П. Исследование свёрточных нейронных сетей класса YOLO для мобильных систем детектирования объектов на изображениях / А. П. Береснев, И. В. Зоев, Н. Г. Марков // Труды Международной конференции по компьютерной графике и зрению "Графикон". – 2018. – № 28. – С. 196-199.
9. Кэлер А., Брэдски Г. Изучаем OpenCV 3 / пер. с анг. А. А. Слинкина. – М.: ДМК Пресс, 2017. – 826 с.
10. TensorFlow 2 Detection Model Zoo // Google. URL: https://github.com/tensorflow/models/blob/master/research/object_detection/g3doc/tf2_detection_zoo.md (дата обращения: 20.05.2024).
11. Tan M. X., Pang R. M., Le Q. V. EfficientDet: Scalable and efficient object detection // Proceedings of IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. − 2020. С.10778−10787. – DOI: 10.1109/CVPR42600.2020.01079.
12. Хрящев, В. В. Использование нейронной сети EficientDet в задаче обнаружения патологий желудка на видеоизображениях эндоскопического исследования / В. В. Хрящев, А. Л. Приоров // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2023. – № 2(46). – С. 185-192. – DOI 10.21685/2227-8486-2023-2-12.
13. Song S. et al. EfficientDet for fabric defect detection based on edge computing // Journal of engineered fibers and fabrics. – 2021. – Т. 16 – №. 1. – С. 155892502110083 – DOI: 10.1177/1558925021100834.
14. Reddy K. S. S. et al. A real-time automated system for object detection and facial recognition // E3S Web of Conferences. – 2023. – №. 430. – DOI: 10.1051/e3sconf/202343001076.
15. Duan K. et al. Centernet++ for object detection // arXiv arXiv:2204.08394 – 2022. – DOI: 10.48550/arXiv.2204.08394 – URL: https://arxiv.org/abs/2204.08394 (дата обращения: 28.04.2024)
16. Suma K. G. et al. CETR: CenterNet-Vision transformer model for wheat head detection // Journal of Autonomous Intelligence. – 2024. – Т. 7. – №. 3. – С. 1-12. – DOI: 10.32629/jai.v7i3.1189.
17. Ma G. et al. Intelligent detection of foreign matter in coal mine transportation belt based on convolution neural network // Scientific Programming. – 2022. – Т. 3. – DOI: 10.1155/2022/9740622.
18. Lim J., Astrid M. Small object detection using context and attention // arXiv arXiv:1912.06319 – 2019. DOI: 10.48550/arXiv.1912.06319 – URL: https://arxiv.org/abs/1912.06319 (дата обращения: 28.04.2024).
19. Бурдуковский С. О. Эффективность моделей Tensorflow в приложении к задаче обнаружения глаз на фотографии / С. О. Бурдуковский // Вестник НГУЭУ. – 2022. – № 2. – С. 228-238. – DOI: 10.34020/2073-6495-2022-2-228-238. – Текст: непосредственный.
20. Drone-tracking-datasets URL: https://github.com/CenekAlbl/drone-tracking-datasets (дата обращения: 27.05.2024).
21. LabelImg URL: https://github.com/heartexlabs/labelImg (дата обращения: 21.05.2024). – Текст: электронный.

Информация об авторах

Власов Сергей Олегович, аспирант, Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН (ИПМ им. М.В. Келдыша РАН), Россия, 125047, Москва, Миусская пл., д. 4, sergvlas25@yandex.ru, ORCID: 0009-0003-3144-0973

Богуславский Андрей Александрович, д.ф.-м.н., доцент, в.н.с., ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, Россия, 125047, Москва, Миусская пл., д. 4, anbg74@mail.ru, ORCID: 0000-0001-7560-339X

Соколов Сергей Михайлович, д.ф.-м.н., профессор, г.н.с., ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, Россия, 125047, Москва, Миусская пл., д. 4, sokolsm@list.ru, ORCID: 0000-0001-6923-2510

Нейроморфный механизм управления заданием по результатам анализа ситуации

В.В. Иванова[1,2], А.А. Демчева[2,3], А.М. Корсаков[2,3]
[1]Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» (СПбГЭТУ «ЛЭТИ»), Санкт-Петербург, Россия
[2]Государственный научный центр Российской Федерации «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики» (ГНЦ РФ ЦНИИ РТК), Санкт-Петербург, Россия
[3]Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (СПбПУ), Санкт-Петербург, Россия

Аннотация
В работе представлены результаты исследования возможности создания нейроморфного механизма управления заданием,для построения которого использовались такие информационно-управляющие элементы, как нейроморфный детектор нештатной ситуации; логические элементы «И», «ИЛИ» и «НЕ»; нейроморфный экстраполятор; а также схема формирования условного рефлекса. В качестве базового элемента в предложенной системе выступает сегментная спайковая модель нейрона (CSNM – CompartmentalSpikingNeuronModel) с возможностью структурного обучения. Натурные испытания на реальном мобильном роботе проводились в условиях ограничения функциональных возможностей рассматриваемого в статье нейроморфного механизма. Исходя из этого, в качестве цели натурных испытаний была выбрана демонстрация способности робота к обучению на примере его движения на «комфортном» расстоянии от препятствий. Результаты экспериментов показали принципиальную применимость предложенного нейроморфногомеханизма управления заданием по результатам анализа ситуации.

Ключевые слова
Нейроморфные системы, спайковый нейрон, спайковые нейронные сети, нейроморфный механизм управления заданием, анализ ситуации.

Благодарности
Результаты получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России №075-00697-24-00 от 27.12.2023 «Исследование и разработка биоподобной системы управления поведением мобильных роботов на базе энергоэффективных программно-аппаратных нейроморфных средств» (FNRG-2022-0016 1021060307690-3-1.2.1;2.2.2).

Neuromorphic task management mechanism based on the results of the situation analysis

Victoria V. Ivanova[1,2], Alexandra A. Demcheva[2,3], Anton M. Korsakov[2,3]
[1]Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI» (LETI), St. Petersburg, Russia
[2]Russian state scientific center for robotics and technical cybernetics (RTC), St. Petersburg, Russia
[3]Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

Abstract
The paper presents the results of a study of the possibility of creating a neuromorphic task management mechanism, for the construction of which such information and control elements as a neuromorphic emergency detector; logical elements «AND», «OR» and «NOT»; a neuromorphic extrapolator; as well as a scheme for the formation of a conditioned reflex were used. The segmental spike model of the CSNM neuron with the possibility of structural learning acts as a basic element in the proposed system. Full-scale tests on a real mobile robot were carried out under conditions of limited functionality of the neuromorphic mechanism considered in the article. Based on this, the purpose of the field tests was chosen to demonstrate the robot's ability to learn by the example of its movement at a "comfortable" distance from obstacles. The experimental results showed the fundamental applicability of the proposed neuromorphic task management mechanism based on the results of the situation analysis.

Key words
Neuromorphic systems, spiking neuron, spiking neural networks, neuromorphic task management mechanism, situation analysis.

Acknowledgements
The work was carried out as the part of the state task of the Russian Ministry of Education and Science for 2024 №075-00697-24-00 "Research and development of a biosimilar sys-tem for controlling the behavior of mobile robots based on energy-efficient soft-ware and hardware neuromorphic tools" (FNRG-2022-0016 1021060307690-3-1.2.1;2.2.2).

Введение

Вычислительные способности биологической нервной системы вдохновляют исследователей на разработку интеллектуальных вычислительных алгоритмов и систем, которые могут обрабатывать информацию более точным, надежным и гибким образом [1]. Передовые технологии интеллектуальных агентов успешно применяются в различных областях, таких как автономное вождение, беспилотные средства и медицинские роботы [2]. При выполнении реальных задач сложная среда требует от интеллектуального агента быстрой адаптации и отказоустойчивости в сложных условиях с различными видами помех. При использовании недорогого устройства необходимо принимать точные решения и быстро реагировать на них после точного сенсорного восприятия. Поэтому существует настоятельная потребность в разработке нового мощного подхода, способного адаптироваться к сложным средам с высокой надежностью, отказоустойчивостью, высокой точностью, высокой скоростью отклика и простотой эффективных вычислений.

Нейроморфные вычисления обладают потенциалом для решения вышеупомянутых задач. К настоящему моменту разработаны биологически инспирированные алгоритмы, основанные на событиях и времени [3, 4]. Был предложен ряд нейроморфных систем, основанных на импульсных (спайковых) нейронных сетях (SNN – SpikingNeuronNetworks), включая HiAER, SpiNNaker, Neurogrid и TrueNorth [5 – 8]. Существуют нейроморфные системы, основанные на специальной логике и памяти, для цифрового моделирования нейронов и синапсов с высокой точностью вычислений [9, 10]. Что касается отказоустойчивых методов нейроморфных систем, то был предложен отказоустойчивый алгоритм маршрутизации в двумерной топологии [11].

Будучи основанными на механизме обработки данных на основе импульсов подобно тому, как это происходит в реальных биологических нейронных системах, SNN играют ключевую роль в нейроморфных вычислениях [12, 13]. Подход к нейроморфным вычислениям может поддерживать комплексное интеллектуальное управление, объединяя восприятие, обучение и принятие решений в режиме реального времени без указания и настройки большого количества гиперпараметров.

В настоящей работе рассматривается возможность построения нейроморфного механизма управления заданием для автономных мобильных роботов, построенной на сегментной спайковой модели нейрона CSNM. Концепция построения такой системы предполагает использование отдельных информационно-управляющих элементов, набор которых и задаёт требуемое поведение объекта (мобильного робота). Высокая открытость такого подхода позволит расширять возможности интеллектуального биологически инспирированного поведения, в потенциале и за счёт реализации на масштабируемых архитектурах параллельных вычислений.

Сегментная спайковая модель нейрона и ее структурное обучение

В настоящей работе в качестве базового элемента нейроморфного механизма управления заданием для автономных мобильных роботов использовалась сегментная спайковая модель [14]. Особенностью модели является способность к структурному обучению – возможность формировать требуемую реакцию нейрона путём его структурного реконфигурирования, не переходя к параметрической настройке. Система в целом характеризуется набором из следующих гиперпараметров: размер нейрона N_s (число сегментов сомы), множество длин дендритов N_d и число возбуждающих и тормозных синапсов N_{syn} для каждого сегмента мембраны. Их значения задают общий вид системы и позволяют сформировать требуемую реакцию нейрона на входные воздействия [15].

Настоящая статья не ставит своей задачей подробное математическое описание использовавшейся модели нейрона. Такое описание можно найти в работе [14].

В рамках задачи структурного обучения CSNM работа ведётся с паттернами импульсов, под которыми мы понимаем совокупность сигналов, поступающих на входы нейрона (дендриты) за некоторый промежуток времени (временное окно). Отдельный входной сигнал представляет собой одиночный импульс единичной амплитуды. Алгоритм структурного обучения спайковой модели нейрона и его исследование представлены в работах [16, 17].

Нейроморфные информационно-управляющие элементы

Как было указано выше, модель нейрона CSNM является базовым элементом для предлагаемого нейроморфного механизма управления заданием по результатам анализа ситуации для автономных мобильных роботов. Далее рассмотрим отдельные нейроморфные элементы информационно-управляющих систем, которые можно строить на её основе.

Нейроморфный детектор ситуации. В качестве следствия из описанного в предыдущем разделе необходимо отметить, что один обученный нейрон CSNM способен решать задачу бинарной классификации [17], или, в

терминах, которые мы будем использовать далее, выступать в качестве нейроморфного детектора ситуации.

Логические элементы. Следующей важной особенностью используемой модели нейрона является возможность реализации на ней таких логических элементов, как «И», «ИЛИ» и «НЕ» (рис. 1).

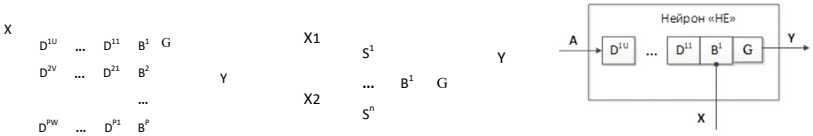


Рисунок 1 — Логические элементы на нейроне CSNM: «И» (а), «ИЛИ» (б), «НЕ» (в)

На рисунке 1G – генератор потенциала действия, Bi – i-й сегмент сомы нейрона, Di,j – j-й сегмент дендрита i-го сегмента сомы, Sn – n-й синапс сомы нейрона.

Для активации нейрона «И» (рис. 1а) необходим одновременный приход импульсов на все его входы (дендриты). Для активации нейрона «ИЛИ» (рис. 1б) достаточно прихода импульса на один (любой) из его входов. Нейрон «НЕ» (рис. 1в), благодаря синхронизирующему импульсу A, сохраняет активность до тех пор, пока на тормозный вход его сомы не поступит инвертируемый импульс X.

Формирование условно-рефлекторных реакций. В работе [18] авторами рассматривается схема формирования условного рефлекса, построенная на CSNM (рис. 2).

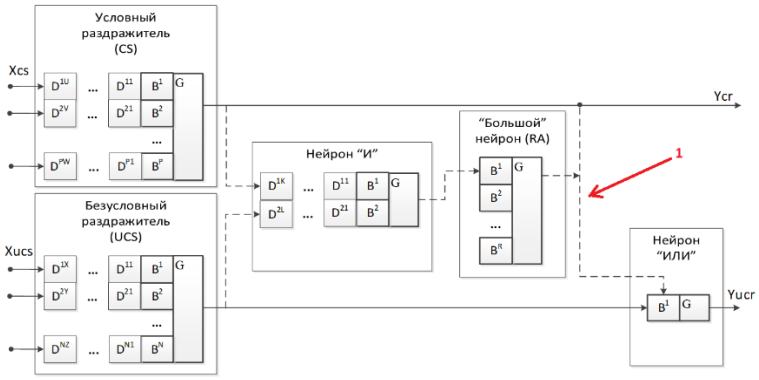


Рисунок 2 — Схема формирования условного рефлекса на CSNM

На рисунке 2G – генератор потенциала действия, Bi – i-й сегмент сомы нейрона, Di,j – j-й сегмент дендрита i-го сегмента сомы.

В результате экспериментов на модельных данных, в [18] было показано, что при одновременной подаче на входы схемы условного и безусловного раздражителей, через определённое параметром время, для вызова безусловной реакции (выход нейрона «ИЛИ») становится достаточно подачи только условного раздражителя, что и означает завершение формирования условного рефлекса. Отметим, что схема позволяет также воспроизводить условный рефлекс с отрицательным подкреплением. Для этого достаточно заменить возбуждающую связь «1» на тормозную. В таком случае, при действии условного раздражителя, даже при активности безусловного раздражителя, безусловной реакции происходить не будет. Далее в настоящей работе будет использоваться формирование условно-рефлекторных реакций с отрицательным подкреплением.

Нейроморфный экстраполятор. В работе [15] авторами была предложена схема нейроморфного экстраполятора (рис. 3).

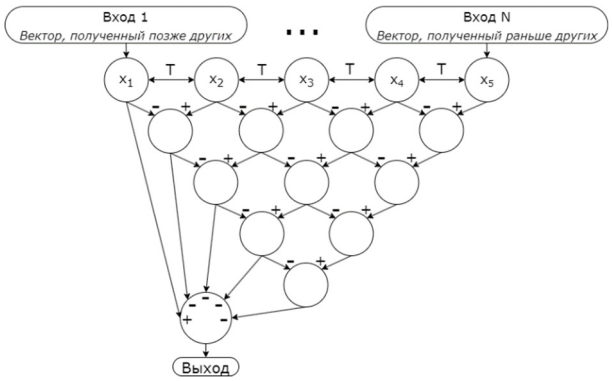


Рисунок 3 — Схема нейроморфного экстраполятора

Схема представляет собой структуру элементарной ячейки сети, на выходе которой формируется прогнозируемое значение входного сигнала в следующий момент времени. Элементы ячейки выполняют операции суммирования и вычитания по аналогии с биологическими нейронами. Преимущество такой модели экстраполятора состоит в простоте вычислений и реализации алгоритма. Прогнозируемые значения любых монотонно изменяющихся сигналов, поступающих на входы ячейки, вычисляются в реальном масштабе времени без перестройки связей между элементами. Значения сигналов вычитаются и суммируются с единичными коэффициентами, что не требует ни специфического обучения с внешним учителем, ни критериев для аппроксимации выхода к входному сигналу, ни восстановления описывающей его функции или функциональной зависимости [19].

Постановка задачи

На основе нейроморфных элементов информационно-управляющих систем, описанных в предыдущем разделе, был предложен нейроморфный механизм управления заданием на основе анализа ситуации (НМУЗ). НМУЗ является частью системы управления (СУ), которая приведена на рисунке 4. Конечной задачей мобильного робота на данном этапе работы являлось движение на комфортном расстоянии от препятствий в помещении с перегородками.

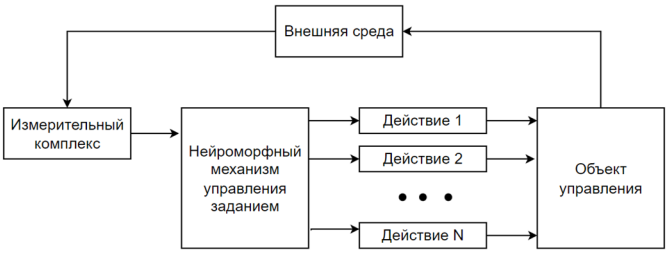


Рисунок 4 — Система управления для автономного мобильного робота

Измерительный комплекс представляет из себя набор сенсоров, который, в нашем случае, ограничивался двумя дальномерами: фронтальным и правым. Кроме того, данный комплекс включал фильтрацию данных медианным фильтром и дальнейшее кодирование информации для представления её в качестве временных задержек для модели нейрона CSNM.

Входной набор данных определялся по формуле (1):

$$X = \{(x_1^1; x_2^1; \dots; x_N^1; y^1), (x_1^2; x_2^2; \dots; x_N^2; y^2), \dots, (x_1^M; x_2^M; \dots; x_N^M; y^M)\} \quad (1)$$

где M – общей размер входных данных, а N – размерность пространства признаков.

Задержку $d_n^m n$-ого признака m-ого примера входных данных X можно вычислить по формуле (2).

$$d_n^m = \frac{x_n^m - x_{min}^n}{x_{max}^n - x_{min}^n} \cdot T, \quad (2)$$

где x_{min}^n – минимальное значение n-ого признака по всему набору данных, x_{max}^n – максимальное значение n-ого признака по всему набору данных, а T – ширина временного окна.

Можно заметить, что кодирование данных в данном случае является простой линейной нормализацией с заданным диапазоном.

На основе принятого НМУЗзадания, объект управления (мобильный робот) мог совершать одно из четырех выбранных действий: движение вперёд, поворот налево, поворот направо и остановка.

Описание нейроморфного механизма управления заданием

На рисунке 5 приведена схема построения системы управлениядля мобильного робота: С – блок «Сенсоры», Ф – блок фильтрации, НМУЗ – нейроморфный механизм управления заданием, НЭ – блок «Нейроморфный экстраполятор», НДНС – блок «Нейроморфный детектор нештатной ситуации», БН – блок «Большой» нейрон», $Д_1$, $Д_2$, $Д_3$ – блоки «Действие», $З_1$, $З_2$, $З_3$ – блоки «Задание», $ДС_у$ – Детектор угла, $ДС_к$ – детектор движения на комфортном расстоянии от препятствия, $ДС_о$ – детектор движения на опасном расстоянии от препятствия, $ДС_{дк}$ – детектор движения на дискомфортном расстоянии от препятствия, $С_б$ – данные от бокового сенсора, $С_п$ – данные от переднего сенсора.

Блоки «Нейроморфный экстраполятор», «Детектор ситуации», «ИЛИ», «НЕ», «И» на рисунке 5, отвечают рассмотренным ранее соответствующим нейроморфным элементам информационно-управляющих систем.

Приведём пошаговое описание функционирования мобильного робота с такимНМУЗ. Блок «Сенсоры» производит измерения расстояния до препятствий спереди и слева и преобразует их в паттерны импульсов. Блок «Нейроморфный детектор нештатной ситуации» представляет собой заранее обученный нейрон CSNM. Обучение происходило на распознавание нейроном значения равного нулю по дальности. До тех пор, пока

мобильный робот находится на значительном расстоянии от препятствия (порог срабатывания по расстоянию определяется параметром порога в низкопороговой зоне CSNM), робот совершает движение вперёд.

Блоки «Задание» и «Действие» также являются нейронами CSNM, имея лишь по одному сегменту сомы и одному сегменту на единственном дендрите. По сути, получая на своих входах единичный импульс, эти нейроны генерируют единичный импульс в ответ. В момент, когда нейрон, соответствующий блоку «Нейроморфный детектор нештатной ситуации», начинает генерировать выходные импульсы, т.е. детектировать ситуацию, когда мобильный робот врезался в стену, появляется ответ и у нейрона «И».

Далее, в соответствии с логикой работы схемы формирования условного рефлекса, блоком «Большой нейрон» создаётся тормозная связь от блоков «Нейроморфный детектор нештатной ситуации» к блоку «Действие». Скорость создания такой связи зависит от размера нейрона. После того, как тормозная связь была создана, даже при активности блока «Задание», активации блока «Действие» не происходит.

Следует обратить внимание, на блок «Нейроморфный экстраполятор», отвечающий за формирование прогноза по поступающему на его вход вектору параметров. Наличие в схеме этого блока, позволяет переключать действие по прогнозу.

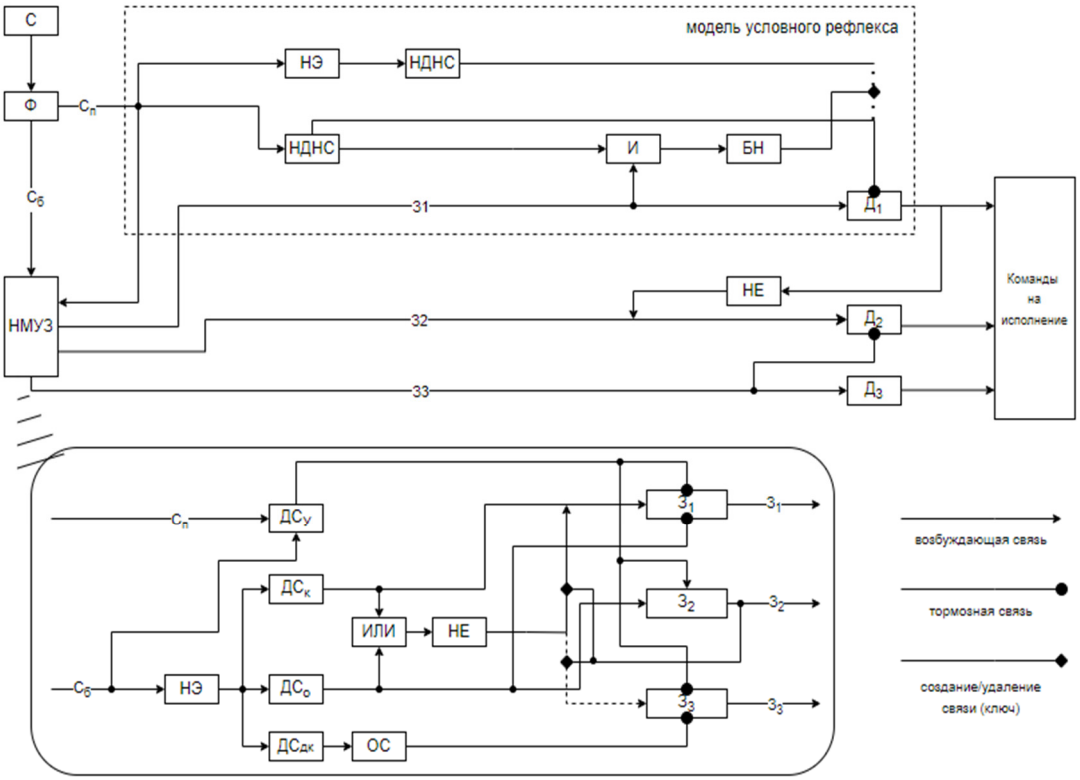


Рисунок 5 — Схема нейроморфного детектора управления заданием

Поясним принцип работы движения робота на комфортном расстоянии от стены (рис.6).Красные стрелки соответствуют вектору движения мобильного робота до принятия решения, синие – после принятия решения. Все три ситуации и принимаемые в них решения можно описать одним общим правилом: мобильный робот стремиться занять зелёную полосу на рисунке 6, названную нами комфортным расстоянием до препятствия.

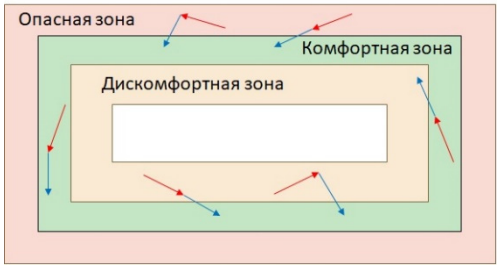


Рисунок 6 — Принятие решения в зависимости от ситуации

Важной особенностью обученной модели нейрона CSNM является её реакция на паттерны импульсов, в большей или меньшей степени отличные от паттерна импульсов, которому данная модель нейрона обучалась

(обучающего примера) [17]. Модель нейрона CSNM способна отвечать на паттерны импульсов до некоторого предела отличные от обучающего примера (близкие обучающему тестовые примеры), однако, время ответа модели нейрона на близкие обучающему тестовые примеры, отлично от времени ответа модели нейрона на обучающий пример. В первом случае это время оказывается больше, т. е. чем ближе входной паттерн импульсов к обучающему примеру, тем быстрее происходит генерация выходного импульса в модели нейрона.

Таким образом, если нейрон-детектор ситуации обучить обучающему примеру, соответствующему одной из границ зон, обозначенных на рисунке 6, то движение к этой границе зоны будет приводить к увеличению скорости ответа нейрона, а движение от неё – к уменьшению этой скорости. Именно это в данном случае и служит для нас критерием принятия того или иного решения.

Проведение экспериментов на мобильном роботе

Эксперимент проводился с использованием робототехнической платформы «Omegabot» с программируемыми модулями. Робототехническая платформа включала в себя колёсную платформу, контроллер, микрокомпьютер RPi3, базовый и аккумуляторный блоки и блок питания. Кроме того, для проведения эксперимента использовались подключённые к базовой основе ультразвуковые дальномеры HC-SR04.

Исходя из указанного выше, целью натурного эксперимента было воспроизведение на мобильном роботе определенного поведения, описанного ранее, т.е. обучение робота движению на «комфортном» расстоянии от стены. В ходе эксперимента робот перемещался по замкнутому пространству. С целью избежать реальных столкновений робота со стеной из всех показаний дальномера в ходе рассматриваемого эксперимента вычиталось фиксированное значение (20 см). Под терминами «большой угол» и «малый угол» далее подразумеваются углы с соответствующими длинами ребер.

На рисунке 7 представлено движение робота по замкнутому пространству. Из начального состояния (а) робот доехал до стены, после поворота налево из-за срабатывания детектора большого угла оказался в зоне, где сработал детектор движения на комфортном расстоянии от препятствия (б). Продолжая движение прямо, робот попал в зону срабатывания детектора движения на дискомфортном расстоянии (в), повернул направо (г), сделал шаг вперед, далее снова оказался в комфортной зоне и поехал прямо. Т.к. движение к стене осуществлялось под углом, сработал детектор малого угла (д), робот повернул налево и снова попал в зону движения на комфортном расстоянии.

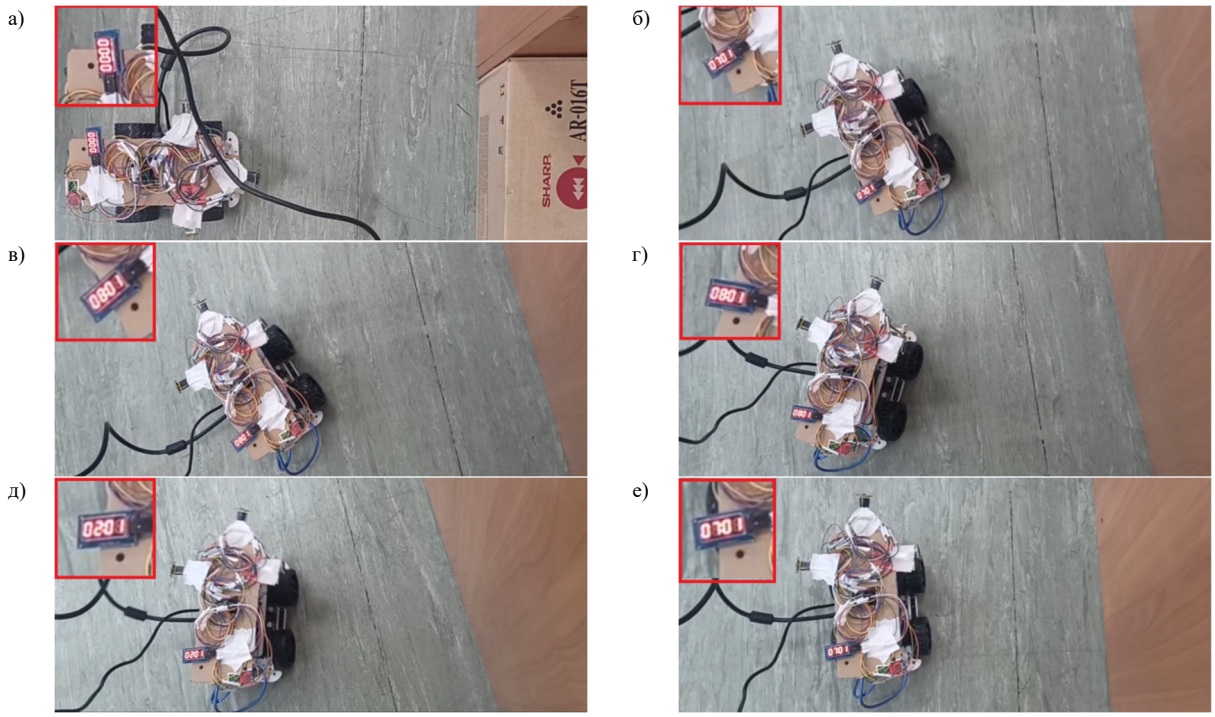


Рисунок 7 — Движение робота в ходе эксперимента

Для удобства определения ситуации на верхней части робота было установлено цифровое табло. Так, например, цифре 0 соответствует начальное состояние, цифре 2 – малый угол, 7 – комфортная дистанция, 8 – дискомфортная дистанция.

Заключение

На примере задачи движения мобильного робота на «комфортном» расстоянии в работе предложена концепция построения нейроморфного механизма управления заданием. Данная концепция подразумевает использование отдельных информационно-управляющих элементов, набор которых задаёт требуемое поведение объекта управления (мобильного робота). В качестве базового элемента для предложенного НМУЗ использовалась сегментная спайковая модель нейрона CSNM с возможностью структурного обучения.

В статье представлены результаты натурных испытаний на мобильном роботе. Эксперименты показали принципиальную применимость предложенного подхода. Среди основных недостатков на данном этапе разработки в работе отмечены возможность ситуаций, приводящих к зацикливанию набора действий, совершаемых мобильным роботом, а также необходимость ручного согласования угловой и линейной скоростей мобильного робота.

По мнению авторов, полученные результаты показывают потенциальную эффективность предложенного нейроморфного механизма управления заданием по результатам анализа ситуации. Намечены пути продолжения этих исследований, направленные на устранение указанных недостатков, а также дальнейшее усложнение моделей поведения, как на компьютерной модели, так и на реальных мобильных роботах.

Литература

1. *Lillicrap T.P. et al.* Backpropagation and the brain // Nat. Rev. Neurosci. 2020. vol. 21. pp. 335–346.
2. *Chen K.H., Chiu G.M.* Fault-tolerant routing algorithm for meshes without using virtual channels // J. Inform. Sci. Eng. 1997. vol. 14. no. 4. pp. 765–783.
3. *Taherkhani A. et al.* A review of learning in biologically plausible spiking neural networks // Neural Netw. 2020. vol. 122. pp. 253–272.
4. *Luo S. et al.* Accelerated adaptive fuzzy optimal control of three coupled fractional-order chaotic electromechanical transducers // IEEE Trans. Fuzzy Syst. 2021. vol. 29. no. 7. pp. 1701–1714.
5. *Benjamin B.V. et al.*Neurogrid: A Mixed-analog-digital multichip system for large-scale neural simulations // Proc. IEEE. 2014. vol. 102. no. 5. pp. 699–716.
6. *Merolla P.A. et al.* A million spiking-neuron integrated circuit with a scalable communication network and interface // Science. 2014. vol. 345. no. 6197. pp. 668–673.
7. *Painkras E. et al.*SpiNNaker: A 1-W 18-core system-on-chip for massively-parallel neural network simulation // IEEE J. Solid-State Circuits. 2013. vol. 48. no. 8. pp. 1943–1953.
8. *Park J. et al.* Hierarchical address-event routing architecture for reconfigurable large scale neuromorphic systems // Proc. Int. Symp. Circuits Syst. 2012. pp. 707–711.
9. *Yang S. et al.* NADOL: Neuromorphic architecture for spike-driven online learning by dendrites // IEEE Trans. Biomed. Circ. Syst. 2023.
10. *Yang S. et al.*SpiNNaker: Smart traffic navigation system for fault-tolerant edge computing of Internet of Vehicle in intelligent transportation gateway // IEEE Trans. Intell. Transp. Syst. 2023. vol. 24. no. 11. pp. 13011–13022.
11. *Fukushima Y. et al.* A hardware-oriented fault-tolerant routing algorithm for irregular 2D-mesh network-on-chip without virtual channels // Proc. IEEE 25th Int. Symp. Def. Fault Tol. VLSI Syst. 2010. pp. 52–59.
12. *Yang S., Chen B.* SNIB: Improving spike-based machine learning using nonlinear information bottleneck // IEEE Trans. Syst. Man Cybern. Syst. 2023.
13. *Yang S. et al.* Spike-driven multi-scale learning with hybrid mechanisms of spiking dendrites // Neurocomputing. 2023. vol. 542.
14. *Bakhshiev A., Demcheva A., Stankevich L.* CSNM: The Compartmental Spiking Neuron Model for Developing Neuromorphic Information Processing Systems // International Conference on Neuroinformatics. 2021. pp. 327–333.
15. *Демчева А.А., Корсаков А.М., Фомин И.С. и др.* Предупреждение возникновения критических ситуаций в сложных технических системах с использованием нейроморфного подхода // Робототехника и техническая кибернетика. 2023. Т. 11. №4. С. 281–291.
16. *Korsakov A., Astapova L., Bakhshiev A.* The method of structural adaptation of the compartmental spiking neuron model // International Conference Cyber-Physical Systems and Control. Cham: Springer International Publishing. 2023. pp. 545–553.
17. *Корсаков А.М., Астапова Л.А., Бахшиев А.В.* Применение сегментной спайковой модели нейрона со структурной адаптацией для решения задач классификации // Информатика и автоматизация. 2022. Т. 21. №3. С. 493–520.
18. *Корсаков А.М., Бахшиев А.В., Астапова Л.А., Станкевич Л.А.* Реализация поведенческих функций на спайковых нейронных сетях // Информатика и автоматизация. 2021. Т. 20. №3. С. 590–621.
19. Экстраполятор: пат. SU 415672 A1 / *Романов С.П.*; заявл. 02.07.1971; опубл. 15.02.1974.

Информация об авторах

Иванова Виктория Владимировна, инженер, лаборатория «Технологии искусственного интеллекта», Государственный научный центр Российской Федерации «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики» (ГНЦ РФ ЦНИИ РТК), Россия, 194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 21, overtpace@gmail.com, ORCID: 0009-0001-0162-1883

*Демчева Александра Андреевна***,** м.н.с., лаборатория «Технологий искусственного интеллекта», ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Россия, 194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 21, a.demcheva@rtc.ru, ORCID: 0000-0002-1208-6353

*Корсаков Антон Михайлович***,** с.н.с., лаборатория «Технологий искусственного интеллекта», ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Россия, 194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 21, anton_korsakov@mail.ru, ORCID: 0000-0002-6132-7504

Автоматизация процесса подготовки данных для обучения нейронных сетей классификации гиперспектральных данных объектов

В.А. Юдаев✉, А.А. Комиссаров, А.С. Егоров
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «ТГТУ»), г. Тамбов, Россия, pt-arta@yandex.ru

Аннотация
В статье отражены ключевые моменты применения систем технического зрения в агропромышленном комплексе при использовании автоматизированного контроля качества овощей и фруктов, произведен набор данных исследуемых объектов контроля (яблони и подсолнухи), решена задача оптимизации сбора данных, получаемых от гиперспектральной камеры для уменьшения времени подготовки данных к обработке, определены основные параметры обучаемой нейронной сети, отражены текущие результаты решения задачи классификации объектов на изображении.

Ключевые слова
Гиперспектральный анализ, техническое зрение, проксимальное зондирование.

Благодарности
Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта «Разработка роботизированного комплекса наземной и воздушной беспилотных платформ для применения в агротехнологиях» (ЕГИСУ НИОКТР: 124062100023-3).

Automation of the process of data preparation for training neural networks for classification of hyperspectral data of objects

Victor A. Yudaev✉, Artem A. Komissarov, Andrey S. Egorov
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Tambov State Technical University» (FSBEI VO «TSTU»), Tambov, Russia, pt-arta@yandex.ru

Abstract
The article reflects the key points of the application of machine vision systems in the agro-industrial complex when using automated quality control of vegetables and fruits, a data set of the studied control objects (apple trees and sunflowers) was produced, the problem of optimizing the collection of data obtained from a hyperspectral camera to reduce the time of data preparation for processing was solved, the main parameters of the trained neural network were determined, and the current results of solving the problem of classifying objects in an image were reflected.

Key words
Hyperspectral analysis, machine vision, proximal sensing.

Acknowledgements
The study was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the project «Development of a robotic complex of ground and air unmanned platforms for use in agricultural technologies» (EGISU NIOKTR: 124062100023-3).

Введение

Системы технического зрения активно внедряют в различные области деятельности человека. В сельском хозяйстве они находят применение для автоматизированного контроля качества овощей и фруктов.

В настоящее время развитие современных технологий контроля состояния растений используют на разных стадиях производственного цикла. Применение систем технического зрения позволяет выявить дефекты на ранних стадиях ее появления: болезни, гниль.

В последние годы сельское хозяйство играет ключевую роль в мировой экономике. По мере того, как население продолжает расти, урбанизация приведет к постепенному сокращению посевных площадей, и давление на сельскохозяйственную систему будет продолжать расти. Спрос на эффективные и безопасные методы производства сельскохозяйственных продуктов питания растет. Традиционные методы управления сельским хозяйством должны дополняться инновационными сенсорными и управляющими технологиями, а также улучшенными информационными и коммуникационными технологиями, для более точного ускорения роста про-

дуктивности сельского хозяйства, тем самым способствуя развитию высококачественного и высокопродуктивного сельского хозяйства. За последние несколько десятилетий системы компьютерного зрения стали важными инструментами в сельскохозяйственных операциях, и их использование значительно увеличилось. Экспертные и интеллектуальные системы, основанные на алгоритмах компьютерного зрения, становятся обычной частью управления сельскохозяйственным производством, а технологии автоматизации сельского хозяйства на основе компьютерного зрения все чаще используются в сельском хозяйстве для повышения производительности и эффективности. С развитием таких технологий, как графические процессоры и DBN (глубокие сети доверия), а также быстрым развитием искусственного интеллекта, возможности технологии компьютерного зрения были значительно улучшены, а эффективность использования ресурсов предоставили много предложений и идей для поддержки принятия решений и практики для фермеров, обеспечивающие эффективность сельскохозяйственного производства. Таким образом, технология компьютерного зрения будет все шире применяться в области автоматизации сельского хозяйства и будет неуклонно способствовать развитию сельского хозяйства в эпоху интеллектуального сельского хозяйства.

Использование различных технических средств

Для мониторинга этапа роста производственного цикла растений в качестве сенсоров применяют камеры видимого, а также мульти- и гиперспектрального диапазона. В свою очередь для классификации данных можно использовать как традиционные методы (каскад Хаара) [1], так и применение сверточных нейронных сетей. Однако применение данных методов для определения болезней растений с использованием камер видимого диапазона недостаточно, поскольку происходит ошибочная классификация тканей растений, не относящихся к дефектам (например, плодоножка и чашелистик у яблока).

Гиперспектральные камеры в свою очередь дают избыточную информацию по широкому спектральному диапазону, что негативно сказывается на общему быстродействию системы. Недостатком мультиспектральных камер является ограниченный диапазон получаемых данных, что влияет на обучение нейронной сети (недостаточность признаков классификации).

В связи с перечисленными способами и методами получения и обработки информации наиболее эффективным способом был выбран метод предварительного сбора данных с помощью гиперспектральной камеры для установления основных значимых диапазонов для классификации данных тканей растений и болезней, для дальнейшего использования мультиспектральной камеры с набором фильтров с применением сверточной нейронной сети [2]. Использование такой камеры позволяет удешевить стоимость системы технического зрения для использования в сельскохозяйственном производстве.

Программное обеспечение гиперспектральных камер позволяет сохранять данные в виде гиперспектрального куба (см. рис 1).

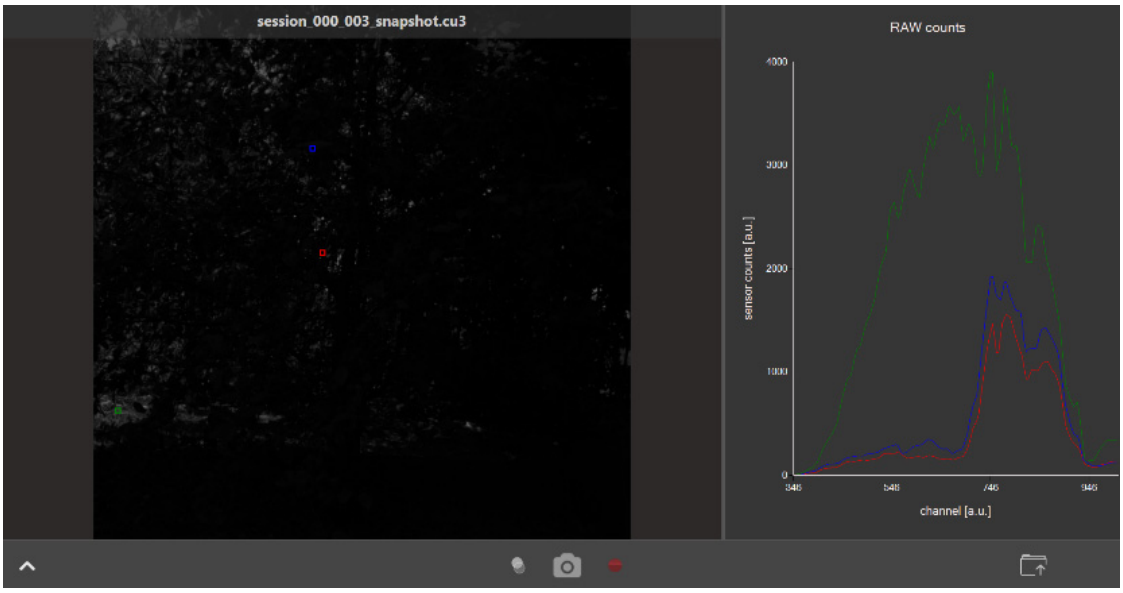


Рисунок 1 — Интерфейс программы гиперспектральной камеры

Разрабатываемый метод сбор данных предназначен для проксимального зондирования состояния растений с использованием беспилотных воздушных и наземных робототехнических платформ. Пример использования беспилотного пилотируемого летательного аппарата (БПЛА) с применением системы с камерой отражены на рисунке 2.

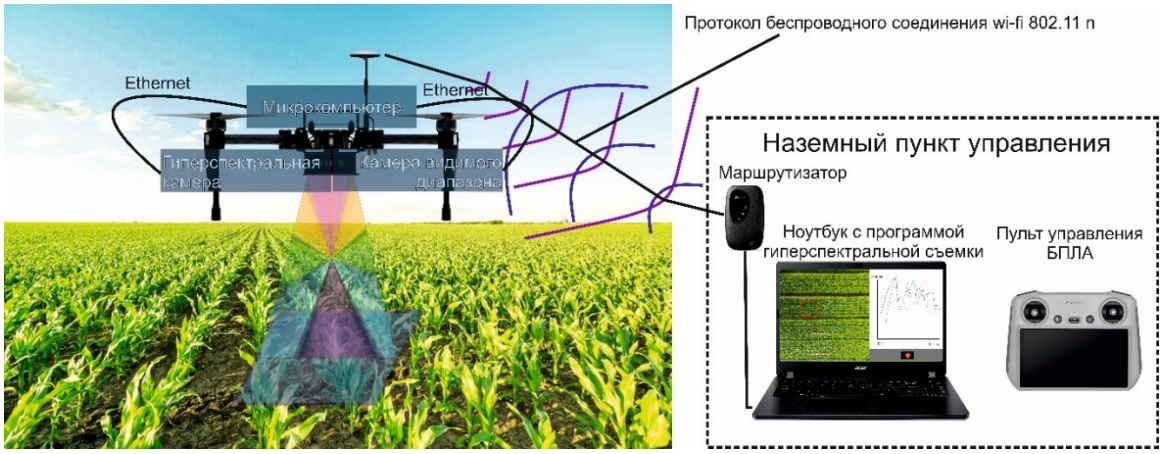


Рисунок 2 — Пример использования БПЛА с системой технического зрения

В данном случае информационная система сбора данных состоит из комплекта камер видимого и гиперспектрального диапазона с разрешением 350..1000 nm, установленные на беспилотный пилотируемый летательный аппарат. Обработка данных с камер осуществляется с помощью мини персонального компьютера с предустановленной операционной системой Windows и специализированным программным обеспечением для сохранения данных снимков в формате гиперкуба и координат GPS/GLONASS, получаемых с антенны. Связь мини персонального компьютера с камерами устанавливается по протоколу Ethernet с пропускной способностью 1Gb/s. Система питается от блока питания с выходным напряжением 12v мощностью 48W, подключенные к аккумуляторубеспилотной авиационной системы.

Для удаленной связи с наземным пунктом используется маршрутизатор с применением протокола беспроводной передачи сигнала WI-FI 802.11n с пропускной способностью 300 Mbit/s. Ноутбук используется оператором для удаленного подключения к мини персональному компьютеру и съемке данных. Гиперспектральную камеру целесообразно использовать в случае предварительного сбора данных. Недостатками применения гиперспектральной съемки следует отметить избыточность собираемых данных, что оказывает значительное влияние на быстродействие системы и в случае с использованием системы технического зрения нецелесообразно. Поэтому перед авторами статьи стоит задача по оптимизации системы технического зрения с разработкой мультиспектрометра, специалированного под задачу распознавания болезней растений. Существующие решения мультиспектральных камер позволяют определять лишь общие параметры состояния зеленой массы в целом и не годятся для оценки состояния точечного проксимального зондирования. Также разрабатываемый мультиспектрометр возможно применять и на наземных мобильных робототехнических платформах.

Набор базы данных для исследований

Для анализа данных необходим сбор данных растений в различных стадиях их жизненного цикла, а также в различных технических условиях.

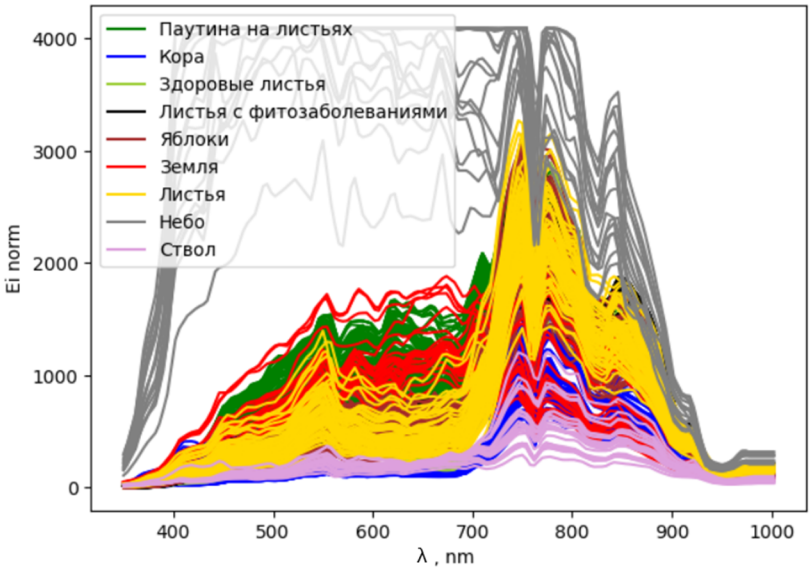


Рисунок 3 — Спектрограммы полученных образцов данных яблонь

Для набора база данных использовались гиперспектральные снимки яблонь и подсолнухов, снятые на территории Тамбовской области.

Классификация гиперспектральных кубов контроля яблонь заключалась в разметке данных на соответствующие классы: паутина на листьях, кора, здоровые листья, листья с фитозаболеваниями, яблоки, земля, листья, небо, ствол. Данная классификация определяла основные типы классов объектов, наиболее часто встречающихся в набранных снимках данных. Спектрограммы данных можно рассмотреть на рисунке 3, где по вертикальной оси Ei располагаются значения отражения камеры в диапазоне значений от 0 до 4095 (12-bit разрядность данных), λ – длина волны (в nm).

Исходя из анализа данных с применением метода PCA анализа, было установлено, что наиболее значимые значения используемых длин волн 550, 670, 710, 750, 810, 838, 882 и 930 нм.

Классификация гиперспектральных кубов контроля заболеваний подсолнухов заключалась в разметке данных на соответствующие классы: здоровые листья (Green), земля (GND), пожелтевшие листья от чрезмерного удобрения почвы гербицидами (herb), семена подсолнуха (semen) Данная классификация спектрограмм данных можно рассмотреть на рисунке 4.

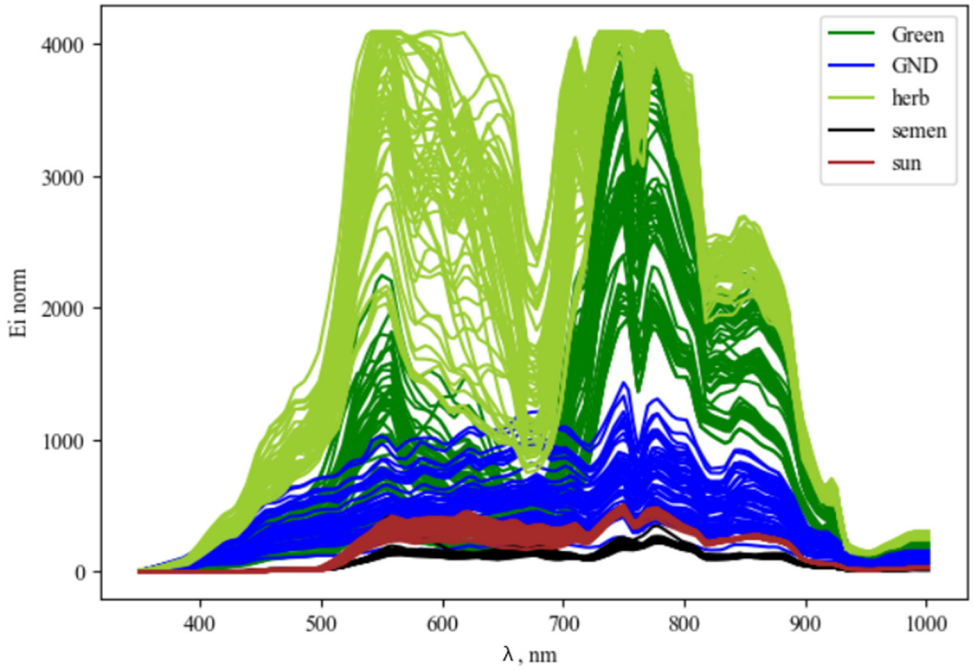


Рисунок 4 — Спектрограммы полученных образцов данных подсолнуха

Оптимизация сбора данных

Для дальнейшей классификации существует потребность в подготовке данных. Для качественной работы сверточной нейронной сети нужен сбор большого объема данных (от 1000 образцов).

Подготовка данных представляет собой нормирование гиперспектральных данных, поскольку в ходе проведения экспериментальных исследований было установлено, что изменение интенсивности освещения оказывает влияние на получаемые данные [3]. Следовательно, для обучения сверточной сети, а также следует нормировать полученные данные.

Поскольку производителем камеры предусмотрена запись в файл только 64 гистограмм данных, то было принято решение о разработке небольшой программы, позволяющей объединять файлы в единый массив.

Результатом работы авторов статьи является разработанное программное обеспечение, позволяющее подготовить гиперспектральные образцы данных для дальнейшего обучения. Эффективность использования программы приведена в таблице 1.

Таблица 1 — Результаты эффективности внедренного программного обеспечения

Количество обработанных спектрограмм, шт	Время, затраченное при обработке ручным способом, с	Время, затраченное с использованием программного обеспечения, с
100	120	13
500	469	52
1000	938	104
2500	2345	260

В результате внедрения программы можно сделать вывод о том, что время, затраченное на обработку данных, сократилось примерно в 10 раз. Использование автоматизированной системы подготовки данных позволит более эффективно использовать время для обработки данных.

Обучение нейронной сети

Для классификации спектрограмм применяется нейронная сеть прямого распространения с двумя скрытыми слоями (рис. 4). При выборе конфигурации сети были проведены экспериментальные исследования зависимости точности классификации объектов контроля от следующих параметров конфигурации сети: количество нейронов в скрытых слоях, тип функции активации в слоях сети, количество эпох при обучении, объем выборки при обучении сети. Проверялись следующие значения: количество нейронов 64, 80, 96, 112, 128 для первого слоя, и 16, 32, 48, 64 для второго слоя. Количество эпох: 10, 20, 30. Batch size: 250, 500, 750, 1000. Предварительные исследования показали, что для достижения точности классификации не менее 50% необходимо использовать следующие функции активации: «sigmoid», «softmax», «relu». Для всех слоев проверялись комбинации данных функций. Общее количество проверенных конфигураций сети составило 6480.

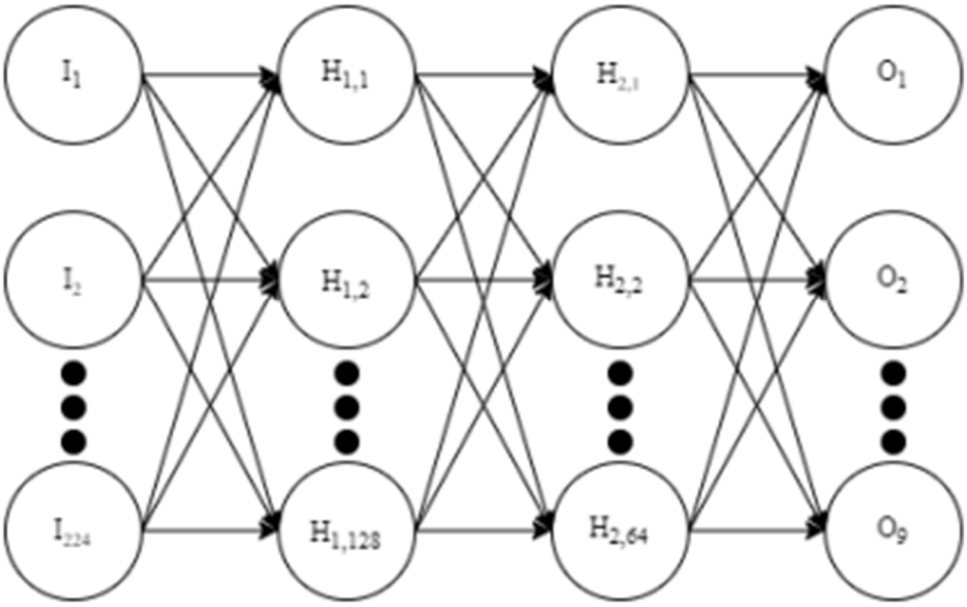


Рисунок 4 — Спектрограммы полученных образцов данных

Данные были разделены на обучающую и тестовую выборки в соотношении 80% на 20%, соответственно. Для программной реализации нейронной сети использовался язык программирования Python 3.7 и библиотека Keras. В результате экспериментальных исследований и расчетов была выбрана нейронная сеть прямого распространения с двумя скрытыми слоями, функцией активации «relu» в скрытых слоях и функцией активации «softmax» в выходном слое. Количество нейронов в скрытых слоях составило 128 и 64 для первого и второго слоя соответственно. Количество эпох обучения составило 30. Batch size равен 250. Данная конфигурация показала точность классификации на тестовой выборке 0.847. Дальнейшее увеличение количества нейронов или эпох в выбранной конфигурации сети не позволило увеличить точность классификации, при этом процесс обучения и классификации происходил с меньшей скоростью.

Результаты

Примеры результирующих изображений яблонь, полученных с использованием мультиспектрометра, представлены на рисунке 5.

Следует отметить, что разрабатываемый мультиспектрометр, в частности его программное обеспечение, смогут позволяют получать сегментированные изображения объектов контроля, где каждый сегмент относится к заранее назначенному классу растительной ткани. Вместе с тем, результирующие изображения мультиспектрометра зависят от используемых в его составе моделей, в частности от их параметров, определенных заранее с использованием гиперспектральных камер и методов анализа данных, что является его недостатком.

Рисунок 5 — Результирующее изображение мультиспектрометра

Литература

1. Юдаев, В. А. Применение каскада Хаара для обнаружения яблок на конвейере / В. А. Юдаев, П. В. Балабанов, А. С. Егоров // Цифровизация агропромышленного комплекса : Сборник научных статей III Международной научно-практической конференции, Тамбов, 25–27 октября 2022 года. Том 1. – Тамбов: Издательский центр ФГБОУ ВО "Тамбовский государственный технический университет", 2022. – С. 35-37.

2. Алгоритм и программное обеспечение для обработки спектрограмм яблок / П. В. Балабанов, А. Г. Дивин, А. С. Егоров, В. А. Юдаев // Современная наука: теория, методология, практика : Материалы 2-ой Всероссийской (национальной) научно-практической конференции, Тамбов, 28–29 мая 2020 года. – Тамбов: Издательство ИП Чеснокова А.В., 2020. – С. 55-57.

3. Юдаев, В. А. Применение методов гиперспектрального анализа для обнаружения дефектов яблок / В. А. Юдаев, П. В. Балабанов, А. С. Егоров // Информационные технологии в управлении и моделировании мехатронных систем : Материалы II научно-практической международной конференции, Тамбов, 14–16 октября 2020 года. – Тамбов: Тамбовский государственный технический университет, 2020. – С. 8-11.

Информация об авторах

Юдаев Виктор Алексеевич, м.н.с., молодежная лаборатория «Интеллектуальные беспилотные робототехнические платформы», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «ТГТУ»), Россия, 392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106/5, пом. 2, pt-arta@yandex.ru

Комиссаров Артем Андреевич, студент, направление «Мехатроника и робототехника», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Россия, 392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106/5, пом. 2, super.komissarova-lena@yandex.ru

Егоров Андрей Сергеевич, доцент, к.т.н., в.н.с., молодежная лаборатория «Интеллектуальные беспилотные робототехнические платформы», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Россия, 392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106/5, пом. 2, egorov.andrey@list.ru

Увеличение скорости вычислений при компьютерном моделировании движения механической системы

И.М. Портнов✉, А.А. Медведева
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет (СПбГМТУ), Санкт-Петербург, Россия, portnovivan2011@mail.ru

Аннотация

В данной статье рассматривается метод ускорения вычислений при моделировании движения механических систем. Описана возможность повышения эффективности экспериментов через оптимизацию расчетов, что позволяет сократить время получения ключевых параметров динамической системы. Исследованы различные подходы к ускорению моделирования изменения положения физической системы в пространстве, с целью улучшения производительности и повышения точности результатов. Полученные выводы могут быть применимы для разработки более эффективных методов моделирования механических систем и оптимизации экспериментальных процессов.

Ключевые слова

Симуляция, группы Ли, ускорение вычислений, метод двойного аргумента, искусственная нейронная сеть, матричная экспонента, моделирование, метод Ньютона.

Благодарности
Исследования выполнены при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках реализации программы Научного центра мирового уровня по направлению «Передовые цифровые технологии» СПбГМТУ (соглашение от 20.04.2022 № 075-15-2022-312).

Acceleration of calculations in mechanical system motion simulation

Ivan M. Portnov✉, Angelina A. Medvedeva
Saint Petersburg State Marine Technical University (SPbSMTU), St. Petersburg, Russia, portnovivan2011@mail.ru

Abstract
This article discusses a method for accelerating computations when modeling the motion of mechanical systems. It describes the possibility of increasing the efficiency of experiments through optimization of calculations, which allows reducing the time for obtaining key parameters of a dynamic system. Various approaches to accelerating the modeling of changes in the position of a physical system in space are studied to improve productivity and increase the accuracy of results. The findings can be used to develop more efficient methods for modeling mechanical systems and optimizing experimental processes.

Key words
Simulation, Lie groups, computational acceleration, double argument method, artificial neural network, matrix exponential, modeling, Newton's method.

Acknowledgements
The research was carried out with the financial support of the Ministry of Education and Science of Russia as part of the implementation of the program of the World-Class Scientific Center in the direction of «Advanced Digital Technologies» of SPbGMTU (agreement dated 04.20.2022 No. 075-15-2022-312).

Моделирование интересующих объектов позволяет исследовать их с разных сторон, получая все необходимые параметры динамической системы. Однако, так как моделирование требует проведения определенного количества экспериментов, возникает потребность в ускорении этого процесса. В данной работе рассматривается метод ускорения вычислений при физически корректном моделировании изменения положения физической системы в пространстве [1-3].

Рассмотрим вариационный интегратор физического маятника на группах Ли, алгоритм представлен на рисунке 1. Этот алгоритм реализован в среде разработки Matlab. Алгоритм выполняется очень долго, для имитации движения объекта в реальном времени мы реализуем алгоритм на C++.

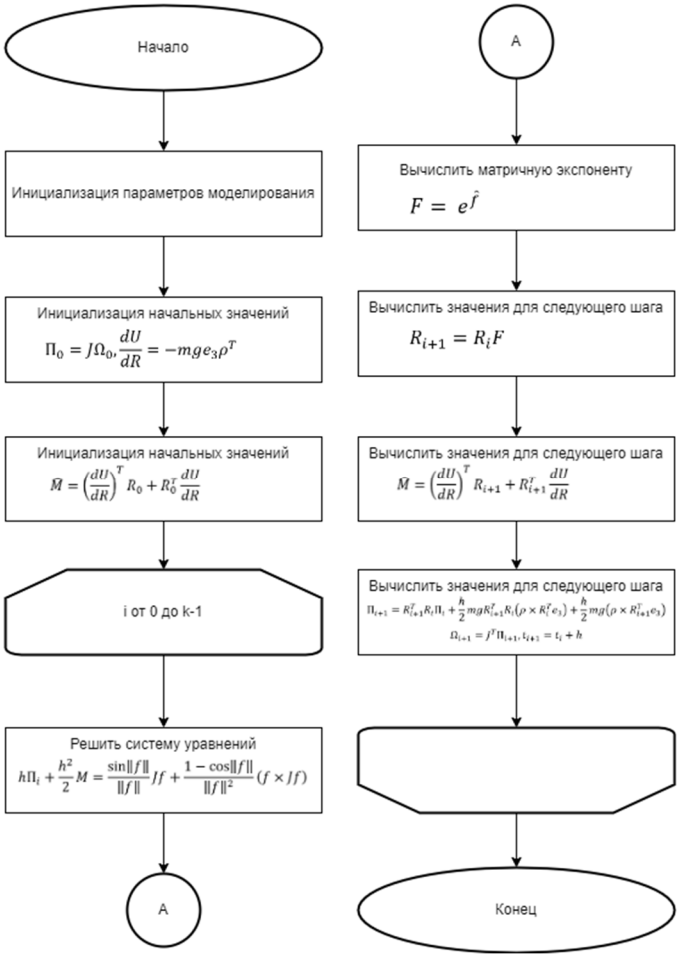


Рисунок 1 — Алгоритм

На одном из этапов моделирования необходимо решить систему из 3 уравнений относительно f. Система представлена в векторно-матричном виде в формуле (1).

$$h\Pi_i + \frac{h^2}{2}M = \frac{\sin\|f\|}{\|f\|}Jf + \frac{1-\cos\|f\|}{\|f\|^2}(f \times Jf) \quad (1)$$

Для удобства введем обозначение: вектор v – результат произведения матрицы J на вектор f (2).

$$v = Jf = \begin{pmatrix} j_{00}f_0 + j_{01}f_1 + j_{02}f_2 \\ j_{10}f_0 + j_{11}f_1 + j_{12}f_2 \\ j_{20}f_0 + j_{21}f_1 + j_{22}f_2 \end{pmatrix} \quad (2)$$

Для решения будем использовать метод Ньютона: перенесем все в левую часть, заменим Jf на v и раскроем векторное произведение. Полученный результат приведен в формуле (3).

$$\begin{cases} \frac{\sin\|f\|}{\|f\|}(v_0) + \frac{1-\cos\|f\|}{\|f\|^2}(f_1v_2 - f_2v_1) - h\pi_0^i - \frac{h^2}{2}m_0 = 0, \\ \frac{\sin\|f\|}{\|f\|}(v_1) + \frac{1-\cos\|f\|}{\|f\|^2}(f_2v_0 - f_0v_2) - h\pi_1^i - \frac{h^2}{2}m_1 = 0, \\ \frac{\sin\|f\|}{\|f\|}(v_2) + \frac{1-\cos\|f\|}{\|f\|^2}(f_0v_1 - f_1v_0) - h\pi_2^i - \frac{h^2}{2}m_2 = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Для метода Ньютона необходимо вычислить якобиан, вычислить 9 частных производных из (4).

$$Jac = \begin{pmatrix} \frac{\partial F_0}{\partial f_0} & \frac{\partial F_0}{\partial f_1} & \frac{\partial F_0}{\partial f_2} \\ \frac{\partial F_1}{\partial f_0} & \frac{\partial F_1}{\partial f_1} & \frac{\partial F_1}{\partial f_2} \\ \frac{\partial F_2}{\partial f_0} & \frac{\partial F_2}{\partial f_1} & \frac{\partial F_2}{\partial f_2} \end{pmatrix} \quad (4)$$

Выпишем отдельно каждый F_i. Выпишем отдельно F_0 - первое уравнение из системы (3) в (5).

$$\begin{aligned} &\frac{\sin\left(\sqrt{f_0^2+f_1^2+f_2^2}\right)}{\sqrt{f_0^2+f_1^2+f_2^2}} \cdot (j_{00}f_0 + j_{01}f_1 + j_{02}f_2) + \\ &\frac{1-cos\left(\sqrt{f_0^2+f_1^2+f_2^2}\right)}{f_0^2+f_1^2+f_2^2} \cdot (j_{20}f_0f_1 + j_{21}f_1^2 + j_{22}f_1f_2 - \\ &-j_{10}f_0f_2 - j_{11}f_1f_2 - j_{12}f_2^2) - h\pi_0^i - \frac{h^2}{2}m_0 = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

Далее необходимо вычислить частные производные. Осталось вычислить обратную матрицу якобиана и с помощью итерационного процесса, представленного в (6), вычислить корень уравнения [3-5].

$$f_{k+1} = f_k - Jac^{-1}(f_k)F(f_k) \quad (6)$$

Условие остановки итерационного процесса дано в выражении (7). Вычисления следует прекратить, когда модуль разности между корнями на итерациях k+1 и k станет меньше заданного значения eps.

$$|f_{k+1} - f_k| < eps \quad (7)$$

Следующий шаг после вычисления корней уравнения – вычисление матричной экспоненты в степени (8).

$$F = e^{\hat{f}}, \hat{f} = \begin{pmatrix} 0 & -f_2 & f_1 \\ f_2 & 0 & -f_0 \\ -f_1 & f_0 & 0 \end{pmatrix} \quad (8)$$

Запишем (9) для вычисления матричной экспоненты по определению.

$$e^{tA} = E + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{t^i A^i}{i!} \quad (9)$$

Поскольку вычисление бесконечного ряда требует бесконечного времени, мы ограничимся вычислением конечного числа его членов [6-8]. Для этого нужно задать условие остановки: на каждом i-м шаге будем вычислять норму матрицы и сравнивать её с заданным значением eps, продолжая расчеты пока норма матрицы больше eps (10).

$$\left\| \frac{t^i A^i}{i!} \right\| \geq eps \quad (10)$$

Будем использовать евклидову норму (норму Фробениуса) (11).

$$\|A\| = \sqrt{\sum_{i=0}^{2}\sum_{j=0}^{2} a_{ij}^2} \quad (11)$$

Однако этот метод вычисления матричной экспоненты имеет проблему: на каждом шаге требуется вычислять факториал, а в C++ целочисленный тип данных позволяет корректно определить только факториалы до 15. Для достижения необходимой точности 16 слагаемых будет недостаточно, поэтому применим метод удвоения аргумента.

Метод основан на свойствах возведения в степень, при возведении числа несколько раз подряд – степени перемножаются (12):

$$e^{tA} = (e^{\frac{t}{p}A})^p \quad (12)$$

То есть, мы вычисляем матричную экспоненту не для матрицы A, а для матрицы $\frac{t}{p}A$. Тогда останется только возвести результат в степень p. Если принять p за 2^k, то для вычисления показателя матрицы воспользуемся следующим алгоритмом:

1. Вычисляем k по формуле (13).

$$k = log_2 \|tA\| \quad (13)$$

2. Вычисление матричной экспоненты в (14).

$$M = e^{\frac{t}{2^k}A} \quad (14)$$

3. Умножение матрицы M на матрицу M умножало новую матрицу, полученную в результате произведения, на себя. Итак, повторите (15) k раз.

$$M = M * M \quad (15)$$

4. Результатом является матричная экспонента (16).

$$M = e^{tA} \quad (16)$$

Метод удвоения аргумент показал себя лучше, но его точности все равно недостаточно. Функционал Matlab позволяет написать библиотеку, сгенерировать эту библиотеку для выбранного языка программирования, в нашем случае C++. Напишем код в Matlab, простую функцию, на входе будет принимать матрицу, на выходе выдавать показатель матрицы. Этот метод расчета демонстрирует хорошую точность, но перед каждым запуском программы необходимо подгружать библиотеки Matlab'a, что занимает много времени.

Для вычисления матричной экспоненты в степени существует формула Родриго (17).

$$F = e^{\widehat{f_k}} = E_{3\times3} + \frac{\sin(\|f_k\|)}{\|f_k\|}\widehat{f_k} + \frac{1-\cos(\|f_k\|)}{\|f_k\|^2}\widehat{f_k}^2 \quad (17)$$

Вычисления в данной формуле простые, результат получается быстрее чем в других методах, хорошая точность. С данным способом вычисления матричной экспоненты ошибка уменьшилась на два порядка.

Существует несколько способов ускорения вычислений, мы будем рассматривать методы, которые не затрагивают изменение технической составляющей компьютера (покупка новых комплектующих, разгон).

Первый способ, который мы рассмотрим – это распараллеливание с помощью CUDA. CUDA (Compute Unified Device Architecture) – это архитектура вычислительных устройств, разработанных компанией NVIDIA. Она позволяет использовать графические процессоры (GPU) для выполнения параллельных вычислений вместо центральных процессоров (CPU). CUDA используется для ускорения работы приложений, требующих большого количества вычислительных мощностей, такие как научные расчеты, анализ больших данных, машинное обучение и игровая графика.

Данный метод не подходит для нас, потому что метод Ньютона плохо распараллеливается, поэтому воспользуемся другим подходом.

Второй способ – это применить нейронную сеть для вычисления корней уравнения. Данный способ ускорит вычисления, так как не надо будет вычислять якобиан, обратную матрицу якобиана, повторять данные действия. Достаточно будет передать нейронной сети входные данные, и простыми вычислениями за один раз получить решение уравнения на выходе [9].

Для искусственной нейронной сети была выбрана следующая структура: 3 входных нейрона, 16 нейронов в первом скрытом слое, 16 нейронов во втором скрытом слое, 3 нейрона в выходном слое. Структура представлена в таблице 1.

Таблица 1 — Структура искусственной нейронной сети

Слой	Количество нейронов	Функция активации	Параметров
Первый слой	(3, 16)	sigmoid	65
Второй слой	(16, 16)	sigmoid	272
Третий слой	(16, 3)	linear	51

Для всех слоев, кроме последнего, функция активации сигмовидная, для последнего слоя – линейная. Функция ошибки была выбрана MSE. Входными данными является левая часть (1), то есть вектор, представленный в (18).

$$h\Pi_i + \frac{h^2}{2}M \quad (18)$$

Можем переходить к экспериментам.

Определим все начальные параметры моделирования в виде формулы (19).

$$h = 0.001, k = 30000, \quad (19)$$

где h - шаг интегрирования, k - количество итераций.

Начальные условия в момент времени $t = 0$ представлены в (20):

$$R_0 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \Omega_0 = \begin{pmatrix} 0.5 \\ -0.5 \\ 0.4 \end{pmatrix}, \quad (20)$$

где R_0 - матрица вращения, Ω_0 - угловая скорость (рад/сек).

Параметры маятника представлены в (21):

$$m = 1, g = 9.81, \rho = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, J = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 2.8 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{pmatrix}, \quad (21)$$

где m - масса маятника (кг), g - ускорение свободного падения ($m \cdot c^{-2}$), ρ - длина от точки подвеса до центра тяжести (m), J - матрица инерции ($kg \cdot m^2$).

Сначала проверим результаты моделирования кода в Matlab и кода на C++ с реализованным методом Ньютона. На рисунке 2 представлено сравнение f[0]. На рисунке 3 представлено сравнение f [1]. На рисунке 4 представлено сравнение f [2].

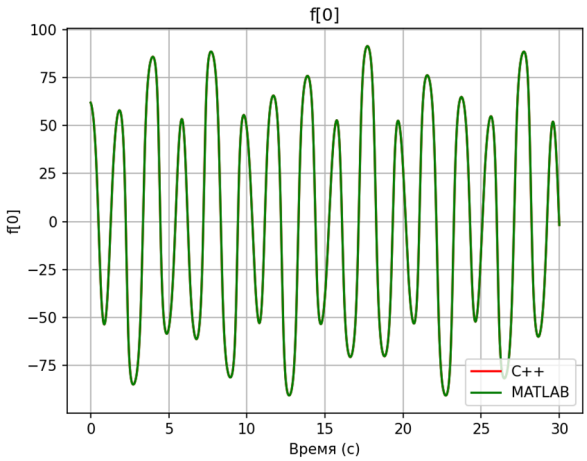


Рисунок 2 — График сравнения

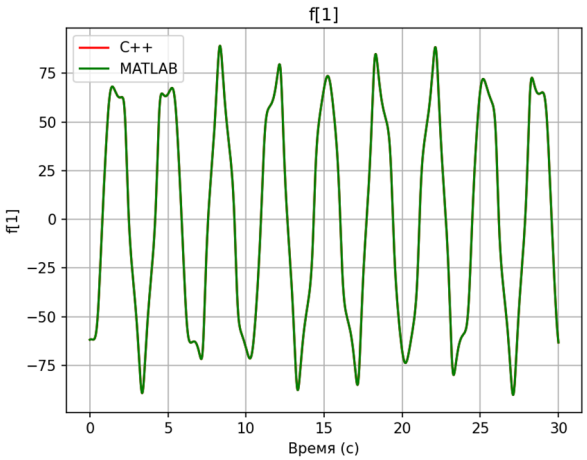


Рисунок 3 — График сравнения

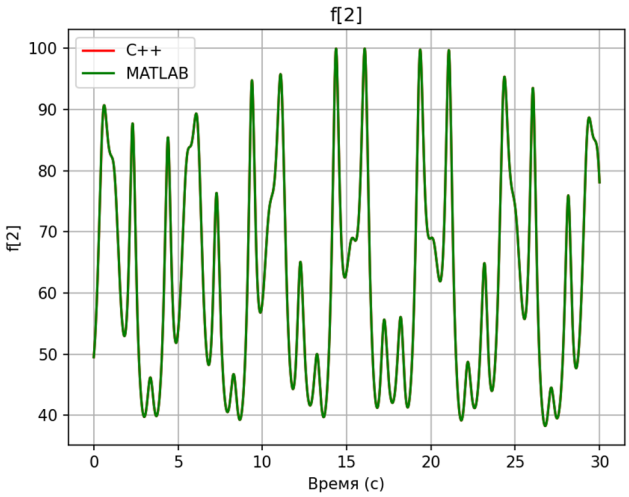


Рисунок 4 — График сравнения

График сравнения ошибок между C++ и Matlab показан на рисунке 5.

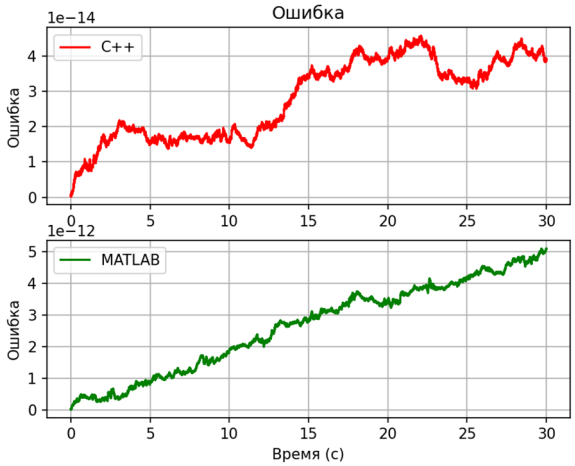


Рисунок 5 — График сравнения ошибки

График сравнения ошибок C++ и Matlab на одном графике показан на рисунке 6.

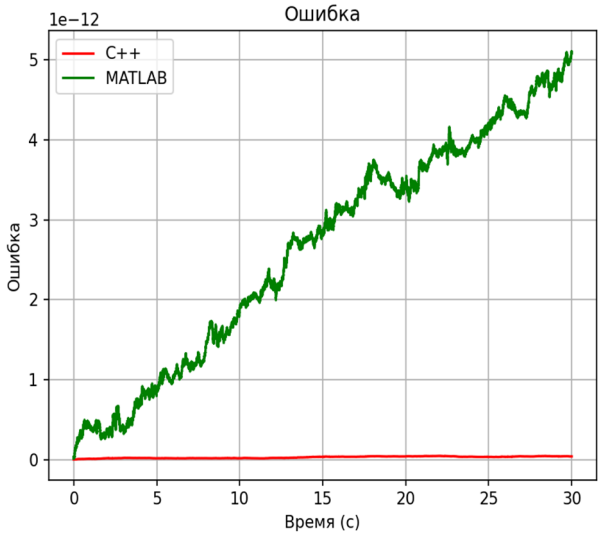


Рисунок 6 — График сравнения ошибки

На рисунке 7 показан график времени выполнения моделирования в зависимости от количества итераций.

Рисунок 7 — График времени моделирования

На рисунке 8 показаны графики сравнения результата работы нейронной сети и метода Ньютона f[0]. На рисунке 9 показаны графики сравнения результата работы нейронной сети и метода Ньютона f[1]. На рисунке 10 показаны графики сравнения результата работы нейронной сети и метода Ньютона f [2].

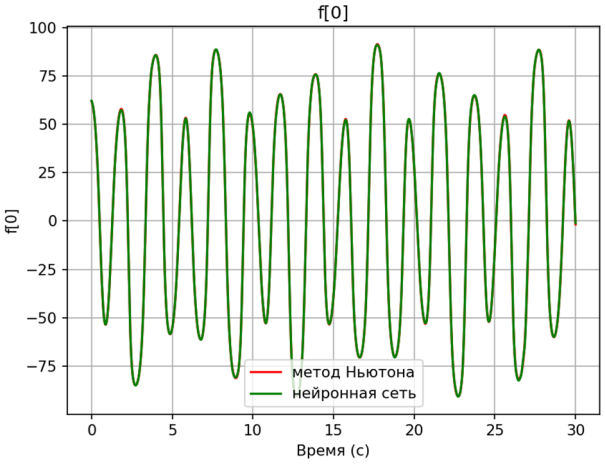


Рисунок 8 — График сравнения

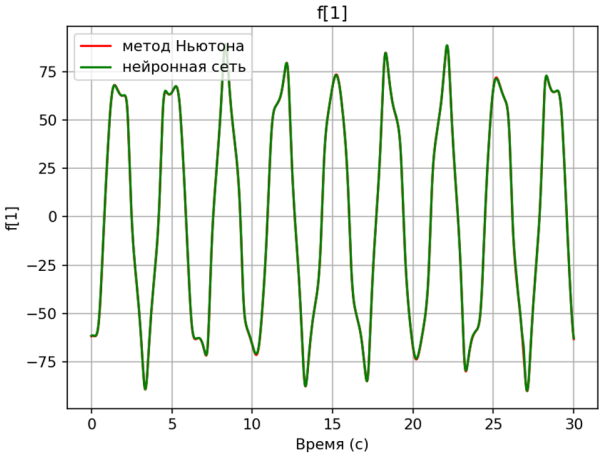


Рисунок 9 — График сравнения

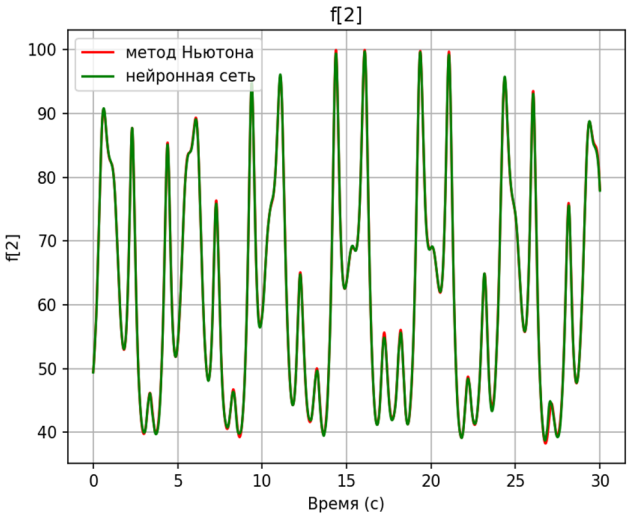


Рисунок 10 — График сравнения

На рисунке 11 представлены графики сравнения времени моделирования при вычислении корней уравнения методом Ньютона и искусственной нейронной сети.

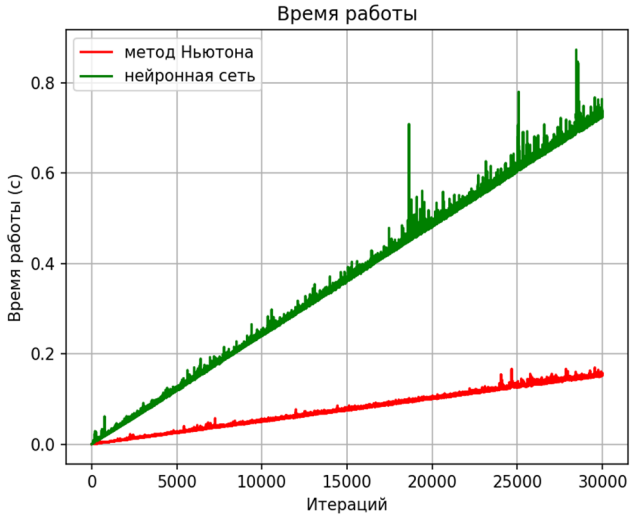


Рисунок 11 — График сравнения времени

В данной работе был рассмотрен алгоритм для физически правдоподобного моделирования движения трехмерного маятника. Для реализации алгоритма были использованы метод Ньютона и искусственная нейронная сеть. Результаты моделирования сравнили с результатами на Matlab. Разработанный алгоритм выполняется быстрее примерно в 80 000 раз, также ошибка уменьшилась на 2 порядка.

Литература

1. Олвер П. Приложения групп Ли к дифференциальным уравнениям / П. Олвер. — Москва: Мир, 1989. — 639 с.
2. Marsden J.E. Introduction to Mechanics and Symmetry / J.E. Marsden, T.S. Ratiu. — New York: Springer, 1999. — 586 p.
3. Nonsingular Integral-Type Dynamic Finite-Time Synchronization for Hyper-Chaotic Systems / K. A. Alattas, J. Mostafaee, S. Mobayen [et al.] // Mathematics. – 2022. – Vol. 10, No. 1. – DOI 10.3390/math10010115. – EDN ZDBGGV.
4. Бураго Ю.Д. Введение в риманову геометрию / Ю.Д. Бураго, В.А. Залгаллер. — Москва: Эдиториал УРСС, 2018. — 320 с.
5. Беляев Ю.Н. Методы вычисления матриц переноса упругих деформаций. // Вестник ПНИПУ. Механика. 2013. №3. с 63-109.
6. Kharevych L., Weiwei Y., Tong Y., Kanso E., Marsden J.E., Schroder P. Geometric, variational integrators for computer animation / Eurographics Symposium on Computer Animation / Austria. — Vienna : Eurographics Association, 2006, pp.43-51.
7. Арнольд В.И. Математические методы классической механики. Москва, Наука, 1989. С. 472.
8. Karpov, A. D. Designing the platform for monitoring and visualization orientation in Euler angles / A. D. Karpov, A. A. Zhilenkov // Proceedings of the 2017 IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference, ElConRus 2017, St. Petersburg, 01–03 февраля 2017 года. – St. Petersburg, 2017. – P. 301-305. – DOI 10.1109/EIConRus.2017.7910551. – EDN XMZGNY.
9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023669639 Российская Федерация. Нейросетевой ускоритель для моделирования движения механической системы с сохранением структуры определяющих уравнений: № 2023668817: заявл. 13.09.2023: опубл. 18.09.2023 / А. А. Жиленков, И. М. Портнов, А. А. Медведева; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет». – EDN VQBPKI.

Информация об авторах

Портнов Иван Максимович, инженер, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет (СПбГМТУ), Россия, 190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, д. 3, portnovivan2011@mail.ru

Медведева Ангелина Андреевна, инженер, СПбГМТУ, Россия, 190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, д. 3, medvedeva2.aa@yandex.ru

Расширение функционала поисковых роботов для обнаружения необходимого пользователям контента на информационных ресурсах систем хранения и обработки данных специального назначения

Е.С. Крюкова, Л.А. Саяркин, И.Б. Паращук✉
Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования «Военная орденов Жукова и Ленина Краснознаменная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного» Министерства обороны Российской Федерации (Военная академия связи), Санкт-Петербург, Россия, shchuk@ramdler.ru

Аннотация
Предложен методологический и научно-практический подход к совершенствованию алгоритмов работы поисковых роботов для обнаружения необходимого пользователям контента на информационных ресурсах систем хранения и обработки данных специального назначения. Основное содержание составляют анализ процедур (операций), исполняемых поисковым роботом, обзор планируемого к применению, в рамках расширения функционала поисковых роботов, математического аппарата нечетких отношений предпочтения и алгоритмов анализа нечетких альтернатив, а также предварительное описание примера сущности и содержания процедур (операций) информационного поиска с расширенным функционалом – учетом нечеткости целей, критериев и границ реализации поисковых запросов. Практическое применение предложенного подхода к расширению функционала поисковых роботов такого класса позволит повысить релевантность информационного поиска, обеспечивая, тем самым, предпосылки для повышения качества информационного обеспечения должностных лиц органов управления специального назначения.

Ключевые слова
Поисковый робот, функционал, информационный поиск, контент, система хранения и обработки данных, релевантность, нечеткие отношения предпочтения, анализ альтернатив.

Expanding the functionality of search robots to detect content needed by users on information resources of special-purpose data storage and processing systems

Elena S. Kryukova, Leonid A. Sayarkin, Igor B. Parashchuk✉
Federal State Treasury Military Educational Institution of Higher Education «Military Orders of Zhukov and Lenin Red Banner Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union C.M. Budyonny» of the Ministry of Defense of the Russian Federation (Military Academy of Communications), St. Petersburg, Russia, shchuk@ramdler.ru

Abstract
A methodological and scientific-practical approach to improving the algorithms of search robots to detect the content needed by users on information resources of special-purpose data storage and processing systems is proposed. The main content consists of an analysis of procedures (operations) performed by a search robot, a review of the mathematical apparatus of fuzzy preference relations and algorithms for analyzing fuzzy alternatives planned for use, as part of expanding the functionality of search robots, as well as a preliminary description of an example of the essence and content of procedures (operations) of information retrieval with expanded functionality - taking into account the vagueness of goals, criteria and boundaries for the implementation of search queries. The practical application of the proposed approach to expanding the functionality of search robots of this class will increase the relevance of information retrieval, thereby providing the prerequisites for improving the quality of information support for officials of special-purpose government bodies.

Key words
Search robot, functionality, information retrieval, content, data storage and processing system, relevance, fuzzy preference relations, analysis of alternatives.

Напряженная политическая ситуация, образовавшаяся в рамках текущего периода становления и развития международных военно-государственных отношений между рядом стран восточно-европейского региона (например, Украина), тихоокеанского региона (например, Тайвань) и на Ближнем Востоке, стимулирует все страны, включая нашу Родину, совершенствовать и, зачастую, даже программно и технически перевооружать свои системы и комплексы, отвечающие за формирование и эффективную эксплуатацию IT-инфраструктуры специального (военного) назначения, за создание Единого информационного пространства Вооруженных сил Российской Федерации [1].

Важными узловыми элементами подобной инфраструктуры по праву считаются системы хранения и обработки данных (СХиОД) [2, 3].

Такие системы специального назначения (СН) строятся на основе современных технологий, включая технологию облачного хранилища, и предназначены для оперативной, безопасной обработки и надежного хранения больших массивов гетерогенных документальных (тестовых), картографических (геопространственных), аудио, графических и других, нередко мультимедийных, данных, необходимых должностным лицам органов управления СН – пользователям информационных ресурсов СХиОД [4-6].

Серверы и системные блоки, жесткие (HDD) и твердотельные (SDD) диски, ленточные или дисковые массивы, стойки контроллеров и накопителей традиционных программно-аппаратных СХиОД СН, а также облачные хранилища, используемые для обработки и хранения информации военного назначения, в условиях, даже небольших и малоинтенсивных, современных высокотехнологичных вооруженных конфликтов, содержат контент, в разы превышающий объемы данных, необходимых для мирного времени и для «гражданских» целей. Речь идет уже не о терабайтах, петабайтах и эксабайтах боевой и вспомогательной информации, а о зеттабайтах и даже йоттабайтах, что объективно делает задачу поиска необходимого пользователям контента на информационных ресурсах СХиОД СН не просто нетривиальной, а проблематичной.

В этой связи задача построения эффективных «поисковых машин», качественных «поисковых движков» и быстрых поисковых алгоритмов для обнаружения на информационных ресурсах СХиОД СН и предоставления пользователям необходимого им контента, становится, безусловно, актуальной. Иными словами, злободневной и насущной становится задача формирования архитектуры и формулировки функционала программных или аппаратно-программных систем, способных осуществлять релевантный и оперативный поиск информации в больших массивах гетерогенных данных, хранимых и обрабатываемых на информационных ресурсах СХиОД СН.

Одним из возможных подходов к построению современных подобных систем является создание, так называемых, поисковых роботов или поисковых агентов – роботов для поиска информации (не путать с роботизированными комплексами для поиска людей и материальных объектов) [7-11].

Поисковый робот – программный продукт (оболочка), определенным образом и с заранее намеченной целью исследующий информационное пространство (информационные ресурсы) СХиОД СН [8].

Поисковый робот, это, пожалуй, самый распространенный класс информационно-поисковых систем, часто называемых также «сетевой паук» («веб-паук», если речь идет о поиске на пространстве Интернет), спайдер, краулер. По-сути, это специальная программа-поисковик, которая является составной частью поисковой системы и предназначена для автоматического «дата-серфинга», для обхода информационных ресурсов (страниц, баз данных) СХиОД СН, чтобы обнаружить необходимый пользователям релевантный контент на этих информационных ресурсах и оперативно предоставить его этим пользователям [7, 8].

Анализ современных поисковых роботов показывает, что их архитектура и функционал зависят от целей и задач, поставленных перед информационно-поисковыми системами такого класса, причем для реализации поисковых запросов должностных лиц силовых ведомств на информационных ресурсах СХиОД СН применяются системы, не в полной мере удовлетворяющие требованиям по своевременности и качеству (релевантности) поиска необходимой пользователям информации.

С этой точки зрения рассматривают две ключевые проблемы:

– поисковые роботы не всегда с достаточной полнотой и точностью предоставляют пользователям СХиОД СН затребованный ими конкретный контент, а «выдают на гора» большое количество ссылок на информационные ресурсы, лишь косвенно содержащих признаки исходного поискового запроса. Иными словами, речь идет о невыполнении поисковыми роботами базовых требований по релевантности и пертинентности реализации поисковых запросов [12];

– поисковые роботы изначально работают в нечеткой («размытой») целевой и критериальной среде, в ходе реализации поисковых запросов пользователей СХиОД СН они не способны учесть объективную неопределенность, нечеткость и многообразие критериев поиска конкретного контента, нечеткость и смысловую неоднозначность целей конкретных запросов, не способны оперативно подстраиваться и находить компромисс при различных нечетко заданных «весах», уровнях «важности», «приоритетности» критериев и целей поиска, например, с учетом нечеткой иерархии пользователей, не могут дифференцировать «значимость» альтернатив при реализации поисковых алгоритмов [13].

Очевидно, что эти две проблемы взаимосвязаны, дополняют друг друга. На наш взгляд, это дает право исследователям говорить о назревшей необходимости расширения функционала поисковых роботов для решения подобных проблем с целью эффективного (оперативного и релевантного) обнаружения необходимого пользователям контента на информационных ресурсах СХиОД СН с учетом нечеткости целей, критериев и границ поиска.

Один из возможных путей решения подобных проблем нам видится в модернизации поисковых роботов, в создании для них современных, методологически и математически корректных поисковых алгоритмов с повышенной оперативностью и релевантностью реализации поисковых запросов пользователей на информационных ресурсах – огромных массивах данных, ориентированных на системы управления специального назначения.

Методологической и математической основой для подобной модернизации, по нашему мнению, могут служить методы принятия решений, базирующиеся на нечетких отношениях предпочтения и алгоритмах анализа нечетких альтернатив [14-16].

Суть данного подхода заключается в следующем. Поисковый робот обеспечивает выполнение главной задачи поиска на информационных ресурсах – удовлетворение информационной потребности должностных лиц органов управления СН – пользователей этих информационных ресурсов СХиОД. При этом информационная потребность представляет собой некий поисковый запрос (как формализованный способ выражения этой потребности), характеризуемый совокупностью ключевых слов, символов, кодовых знаков, фраз или словосочетаний, «дающих представление» поисковому роботу о том, какой контент ищет пользователь на информационных ресурсах СХиОД СН.

Серьезная проблема, связанная с осуществлением оперативного и релевантного роботизированного информационного поиска на ресурсах СХиОД СН, заключается в разработке поисковой стратегии для роботов такого класса – в создании алгоритма реализации роботом поисковых запросов учетом нечеткости их формулировки, и, как следствие, нечеткости целей, критериев и границ поиска. Именно это направление, на наш взгляд, является перспективным с точки зрения потенциального расширения функционала поисковых роботов.

Типовой функционал современных поисковых роботов опирается на «пошаговый» универсальный алгоритм реализации поисковых запросов, как на заранее запрограммированную совокупность исполняемых роботом процедур (операций), причем осуществляемых в установленном порядке, но которые могут, на наш взгляд, быть расширены, модифицированы для учета нечеткости целей, критериев и границ поиска по следующим направлениям:

– процедура (операция) формальной формулировки и уточнения запроса – по сути, это программно-информационная подготовка поиска, определение типа поисковой задачи, зачастую, с использованием опыта решения аналогичных задач ранее. В рамках данной процедуры уточняется контекст тематических поисковых фраз и словосочетаний в рамках запроса, дополняются исходные данные о предмете (объекте) поиска с учетом того, что, даже хорошо сформулированные поисковые фразы и словосочетания, могут иметь не до конца четкий семантический (лексический, понятийный) смысл и быть равными по смыслу, связанными по смыслу, общетематическими, разными по смыслу и даже «нечеткими до бессмысленности» [17];

– процедура (операция) моделирования источника релевантного контента с учетом нечеткости целей, критериев и границ поиска. В рамках данной процедуры выявляется эталонный, лучший источник контента, который бы полностью отвечал характеру поисковой задачи. Это задача идеального поиска, поэтому она почти невыполнима, поскольку поисковый робот, работающий на одном источнике, не даст пользователю гарантированно релевантного контента.

Поэтому зачастую переходят к реализации сложных, разветвленных запросов в нечеткой среде. Эти запросы требуют обращения поискового робота к нескольким, а иногда, и ко многим, «потенциально полезным» источникам контента, расставляя приоритеты, например, по уровню полезности. Полезность источника может быть определена, например, на основе нечетких отношений предпочтения. При этом поисковый робот переходит в режим моделирования «сплошного поиска», т.е., моделирует (исследует), с учетом расставленных с помощью анализа нечетких альтернатив, приоритетов, все информационные источники контента на информационных ресурсах СХиОД СН [18].

– процедура (операция) выбора поисковым роботом оптимального направления (пути) поиска с учетом данных моделирования. Среди имеющегося множества источников контента поисковый робот ищет на информационных ресурсах СХиОД СН (с использованием сканирования цифровых каталогов, картотек, классификаторов и баз данных) близкие по характеру поисковой задачи источники, ранжированные с учетом анализа нечетких предпочтений (альтернатив);

– процедура (операция) собственно реализации роботом поискового запроса. В рамках данной процедуры робот добивается получения конкретного ответа в соответствии с запросом, причем просмотр информационных источников контента, выявление и отбор нужной информации из этих источников осуществляется на основе четко либо нечетко заданных критериев и показателей качества (ПК) информационного поиска. При этом в качестве критериальной меры качества реализации поисковых запросов, в большинстве случаев, используют два показателя – полноту и точность информационного поиска, которые в совокупности определяют релевантность поиска, как меру соответствия данного запроса требованиям пользователя;

– процедура (операция) анализа результатов информационного поиска, осуществленного поисковым роботом на информационных ресурсах СХиОД СН с учетом нечеткости целей, критериев и границ реализации поисковых запросов. В рамках данной процедуры осуществляется оценка (проверка) полноты и точности, т.е., релевантности информационного поиска. Подобный анализ результатов работы поискового робота также может быть осуществлен на основе четко либо нечетко идентифицированных оценок полноты и точности.

Рассмотрим вариант потенциального расширения функционала поискового робота на примере процедуры (операции) моделирования процесса поиска идеального источника релевантного контента с учетом нечеткости целей, критериев и границ этого поиска.

При практическом включении в поисковые алгоритмы роботов такого класса процедуры (операции) моделирования процесса поиска идеального источника релевантного контента, обычно имеют ввиду несколько наиболее распространенных типовых моделей: булеву модель поиска, векторную (пространственно-векторную) и вероятностную модель, которые достойно проявили себя при моделирования либо отдельных источников информации, либо нескольких источников, в их взаимосвязи в рамках реализации поисковых запросов для гарантированного обнаружения релевантных объектов таких запросов [19].

Подобные булевы, векторные (пространственно-векторные) и вероятностные модели способны адекватно описать, как объекты информационного поиска и аппаратно-программные средства самих поисковых роботов организованы в поисковые структуры, опираясь, соответственно, на булеву логику (логические операторы), векторные величины или вероятностные норму. Вместе с тем, их математическая сложность (и связанные с этим трудности их программной реализации) делает их прямое применение нерациональным.

Более того, классические модели поиска не учитывают объективную качественно-количественную (лингвистическую) неопределенность исходных данных для релевантного и оперативного поиск информации в больших массивах гетерогенных данных, хранимых и обрабатываемых на информационных ресурсах СХиОД СН, не учитывают нечеткость параметров текущего состояния и итогов поиска, вызванные различного вида воздействиями, не принимают во внимание нечеткие отношения предпочтения пользователей при выполнении поисковых запросов и иные категории и аспекты нечеткости.

Именно поэтому при практическом включении в поисковые алгоритмы роботов процедуры (операции) моделирования процесса поиска идеального источника (среди множества источников) релевантного контента, по нашему мнению, необходимо учитывать и использовать положения теории нечетких множеств, например, на следующих этапах:

– в процессе выявления эталонного, лучшего источника контента, который бы полностью отвечал характеру поисковой задачи, нужно вводить определенные ограничения, так как конкретный запрос, определяющий предмет (объект) поиска, роботу необходимо декомпозировать на совокупность иерархически связанных по контексту тематических поисковых фраз и словосочетаний с учетом неопределенности (нечеткости) критериев и смысловых границ информационного поиска на информационных ресурсах СХиОД СН;

– на стадии моделирования границ поиска на множестве источников изначальная нечеткость приоритетов, неконкретность целей пользователей (экспертов) при формулировке поисковых запросов, обуславливает объективную необходимость применения методов теории нечетких множеств – нечетких отношений предпочтения и алгоритмов анализа нечетких альтернатив. На этой стадии процедуры (операции) моделирования процесса поиска идеального источника релевантного контента структура поиска и иерархия его отдельных подпроцедур зависят от того, каким образом конкретный запрос, определяющий предмет (объект) поиска, разделяется на совокупность иерархически связанных по контексту тематических поисковых фраз и словосочетаний, поскольку взаимосвязь между отдельными операциями поиска изоморфна по отношению к взаимосвязи соответствующих поисковых фраз и словосочетаний;

– в рамках поиска идеального источника релевантного контента на информационных ресурсах СХиОД СН важно поэтапно проанализировать весь процесс разделения конкретного запрос, определяющего предмет (объект) поиска на частные тематические поисковые фразы и словосочетания, с учетом того факта, что при реализации каждой дальнейшей процедуры (операции) применяется свой метод обработки нечетких множеств и анализа нечетких отношений.

Таким образом, в рамках процедуры (операции) моделирования процесса поиска идеального источника релевантного контента на информационных ресурсах СХиОД СН и при реализации иных, ранее рассмотренных процедур (операций), возложенных на поискового робота, предлагается подход, позволяющий устранить неопределенность (нечеткость) разнообразных критериев поиска конкретного контента, нечеткость и смысловую неоднозначность целей конкретных запросов.

Данный подход позволит поисковому роботу оперативно подстраиваться и находить компромисс при различных нечетко заданных «весах», уровнях «важности», «приоритетности» критериев и целей поиска, например, с учетом нечеткой иерархии пользователей, позволит адаптивно дифференцировать «значимость» альтернатив при реализации поисковых алгоритмов.

Предложенный подход, ориентированный на расширение функционала поисковых роботов, основан на использовании нечетких отношений предпочтения и алгоритмов анализа нечетких альтернатив, позволяющих не только формулировать оптимальное множество показателей качества информационного поиска, соответствующих совокупности свойств, влияющих на итоговое качество данного процесса в целом, но и учесть нечеткость целей, критериев и границ поиска необходимого пользователям контента на информационных ресурсах СХиОД СН при реализации этим поисковым роботом всех (или почти всех) поисковых алгоритмов и процедур.

Литература

1. Козичев В.Н., Сухорутченко В.В., Каргин В.Г. Единое информационное пространство Вооруженных сил Российской Федерации, принципы и аспекты формирования // Военная мысль. 2022. №5. С.148-150.

2. Темкин И.О., Баранникова И.В., Конов И.С. Аппаратные средства хранения и обработки данных:

технические средства хранения данных. – М.: Издательский Дом НИТУ «МИСиС», 2018. – 44 с.

3. Никольский И.М. Распределенная обработка данных: учебно-методическое пособие. – М.: Издательство Московского университета, 2023. – 28 с.

4. Паращук И.Б. Вопросы безопасности применения инфокоммуникационных технологий, реализующих «облачные» сервисы для абонентов систем специального назначения // Актуальные проблемы защиты и безопасности: Труды XVIII Всероссийской научно-практической конференции РАРАН. 1-4 апреля 2015. – СПб.: ФГБУ «РАРАН», 2015. С. 178-183.

5. Митько Е.А., Масейчик Е.А. Развитие облачных технологий для хранения и обработки информации военного назначения // Материалы 59-ой научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР. – Минск: 2023. С. 59-60.

6. Михайличенко А.В., Паращук И.Б. Надежность компонентов хранения и обработки данных для систем управления наземными робототехническими комплексами военного назначения // Extreme Robotics. 2022. Т. 1. № 1. С. 109-114.

7. Маркова Т.И., Захарова К.В. Поисковые роботы // Вестник Волжского университета им. В. Н. Татищева. №12, 2009. С. 61-67.

8. Аладин Д.В., Афанасьев Г.И. Анализ современных поисковых роботов // Теория и практика современной науки. №3 (21), 2017. С. 907-913

9. Касумов В.А. Поисковый робот информационно-поисковой системы узлов Интернет академические сети // Управляющие системы и машины. 2001. №5, С. 80-86.

10. Kanjaruek S., Li D. Data-Information Retrieval based Automated Ontology framework for Service Robots // 2014 International Conference on Manipulation, Manufacturing and Measurement on the Nanoscale (3M-NANO) Taipei, Taiwan. 2014. pp. 705-730

11. Buttcher S., Clarke L.A., Cormack G.V. Information retrieval: implementing and evaluating search engines. MIT Press. Cambridge, Massachusetts. 2010. – 624 p.

12. Миронов А.Л., Миронова Г.В. Соотношение релевантности и пертинентности поисковой выдачи // Материалы Национальной научно-практической конференции с международным участием «Актуальные проблемы агроинженерии в XXI веке». – п. Майский: ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ, 2023. С. 257-260.

13. Чернов В.Г. Нечеткие множества. Основы теории и применения: учеб. пособие. – Владимир: Изд-во ВлГУ, 2018. – 156 с.

14. Саяркин Л.А., Паращук И.Б., Владимирова Е.С. Этапы и особенности разработки методики повышения качества информационного поиска на ресурсах современных центров обработки данных с использованием нечетких отношений предпочтения и сравнения альтернатив // Информация и космос. № 1, 2024. С. 38-45.

15. Паращук И.Б., Михайличенко А.В., Саяркин Л.А. Реализация поисковых информационных запросов в крупных дата-центрах с использованием математических методов теории нечетких множеств // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов (СинхроИнфо). Т. 15, № 3, 2024. С. 20-27.

16. Винокуров А.С., Белов И.В., Баженов Р.И. Использование метода нечеткого отношения предпочтения для принятия оптимального решения по выбору цифрового фотоаппарата // Современная техника и технологии. 2014. №11 [Электронный ресурс]. URL: https:// technology.snauka.ru/2014/11/4868 (дата обращения: 22.05.2024).

17. Панкова Л.А., Пронина В.А. Семантический текстовый поиск, основанный на теории нечетких множеств // Искусственный интеллект и принятие решений. №3, 2013. С. 19-23.

18. Рыжов А.П. Модели поиска информации средствами теории нечетких множеств: монография. – М.: Изд-во МГУ им. М.В. Ломоносова. 2004. – 96 с.

19. Котов Э.М., Целых А.Н. Исследование моделей информационного поиска // Известия Южного федерального университета. Технические науки. № 4 (93). 2009. С.163-168.

Информация об авторах

Крюкова Елена Сергеевна, к.т.н., преподаватель, Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования «Военная орденов Жукова и Ленина Краснознаменная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного» Министерства обороны Российской Федерации (Военная академия связи), Россия, 194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий проспект, д. 3, e.kkrukovaa69@yandex.ru

Саяркин Леонид Андреевич, адъюнкт (аспирант), Военная академия связи, Россия, 194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий проспект, д. 3, leonid.sayarkin@yandex.ru

Паращук Игорь Борисович, профессор, д.т.н., Заслуженный изобретатель Российской Федерации, профессор кафедры, Военная академия связи, Россия, 194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий проспект, д. 3, shchuk@rambler.ru, ORCID: 0000-0001-8793-7768

Роботизированная система для сердечно-сосудистых вмешательств

Д.Ю. Колпащиков✉, О.М. Гергет
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова Российской академии наук (ИПУ РАН), Москва, Россия, d.y.kolpashchikov@gmail.com

Аннотация
Сердечно-сосудистые заболевания является одной из основных причин смерти во всем мире. Современные методы лечения основаны на имплантации медицинского устройства малоинвазивным способом через катетер. Разработка роботизированного комплекса позволит повысить качество лечения для пациентов и хирургов. В работе представлен концепт роботизированного комплекса, состоящего из системы визуального ассистирования и системы доставки. Система визуального ассистирования обеспечивает информационную поддержку: выделяет анатомические структуры, маркирует инструмент и обеспечивает обратную связь для системы доставки. Система доставки обеспечивает прецизионное движение инструмента: катетеров, вставленных в оснастку.

Ключевые слова
Сердечно-сосудистые заболевания, роботы, техническое зрение.

Благодарности
Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта № 24-19-00084.

Robotic complex for cardiovascular interventions

Dmitrii Yu. Kolpashchikov✉, Olga M. Gerget
V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences (ICS RAS), Moscow, Russia, d.y.kolpashchikov@gmail.com

Abstract
Cardiovascular diseases are one of the leading causes of death worldwide. Modern treatment methods are based on implantation of a medical device in a minimally invasive way through a catheter. The development of a robotic complex will improve the quality of treatment for both patients and surgeons. The paper presents a concept of a robotic complex consisting of a visual assistance system and a robotic delivery system. The visual assistance system provides information support: highlights anatomical structures, marks the instrument and provides feedback for the delivery system. The robotic delivery system ensures precision movement of the instrument: catheters inserted into the equipment.

Key words
Cardiovascular diseases, robots, technical vision.

Acknowledgements
The study was financially supported by the Russian Science Foundation under scientific project No. 24-19-00084.

Введение

Сердечно-сосудистые заболевания является одной из основных причин смерти во всем мире [1]. В большинстве случаев причинами развития патологии являются проблемы, вызванные функционированием работы сердечных клапанов. Значительную долю сердечно-сосудистых заболеваний занимает ишемическая болезнь сердца. Современные методы лечения, в частности, стентирование и клапанная терапия стентоподобными устройствами (TAVR), являются высокоэффективными подходами, которые существенно улучшают прогноз пациента. Принципом обоих методов является имплантация медицинского устройства – стента или транскатетерного клапана, малоинвазивным способом через катетер, вводимый в сосудистую систему человека. Точное позиционирование любого эндоваскулярного устройства согласно анатомическим ориентирам и его безопасное высвобождение являются ключевыми моментами в успешном хирургическом лечении. Ключевыми факторами, влияющими на успешность лечения, являются средства визуального контроля и профессионализм хирурга.

Способом улучшения качества вмешательства является разработка роботизированного комплекса для сердечно-сосудистых вмешательств. Сегодня четко просматривается мировой тренд и потребности медицины в роботизации различных медицинских инструментов и процедур. Роботы уже активно используются для проведения медицинских вмешательств в различных областях реабилитации, помощи лицам с ограниченными возможностями и обслуживания больниц [2].

Использование роботизированного комплекса для сердечно-сосудистых вмешательств даст весомые преимущества как для пациентов, так и для хирургов. Пациенты получат повышение качества лечения за счет использования меньшего объема контрастного вещества и обеспечения возможности точно и безопасно осуществлять манипуляции на движущихся структурах на значительном расстоянии от точки входа катетера, что в свою очередь упредит повреждения мягких тканей при проведении хирургических операций, снизит послеоперационные осложнения и ускорит реабилитацию пациентов. Хирурги получат эргономичное место для работы и снижение лучевой нагрузки за счет вывода системы управления за пределы зоны воздействия рентгеновского излучения [3].

Роботизированный комплекс состоит из двух элементов: системы визуального ассистирования и роботизированной системы доставки медицинского инструмента. Задачей системы визуального ассистирования является информационная поддержка хирурга и обеспечение обратной связи для системы доставки. Роботизированная система доставки медицинского инструмента предназначена для прецизионного управления медицинским устройством. Обе системы работают вместе для обеспечения наилучшего качества вмешательства. Однако они так же способны работать и по отдельности для обеспечения помощи хирургу в навигации и позиционирования устройства.

Визуальное ассистирование

Задачей системы визуального ассистирования является детектирование и отслеживание медицинского инструмента внутри движущихся анатомических структур, а также самих анатомических структур посредством эффективных методов обработки изображений в режиме реального времени. Для решения этой задачи используются нейронные сети глубокого обучения [4].

Сегментация мягких тканей на снимках рентгена, в частности корня аорты помогает улучшить визуализацию и ориентацию в процессе проведения операции (см. рис. 1). Даже статическое расположение маски корня аорты помогает улучшить визуальное восприятие тем самым снижает нагрузку на врачебное звено. Сегментация корня аорты также позволяет отслеживать пространственное положение анатомических точек, таких как корень аорты, служащие ориентирами для навигации при установке имплантата при процедуре TAVR.

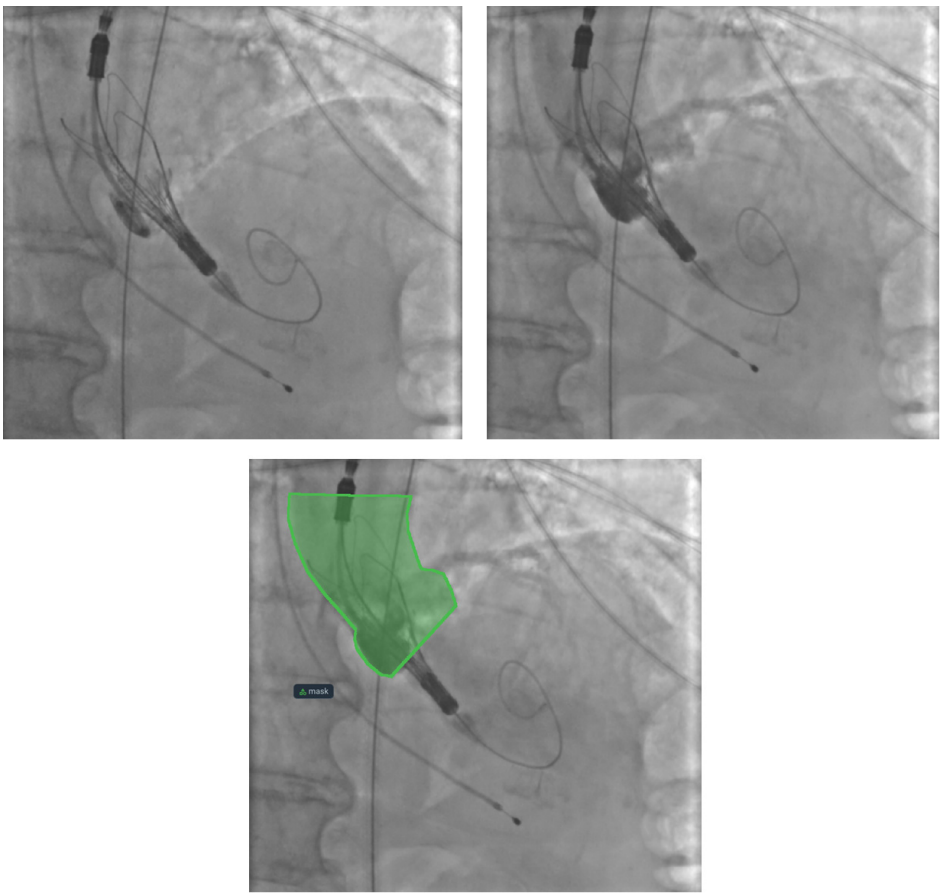


Рисунок 1 — Сегментация корня аорты на изображении: слева – изображение без контрастного вещества; справа – изображение с контрастным веществом; снизу – изображение с наложенной маской

Маркировка и отслеживание инструмента и анатомических ориентиров (см. рис. 2) в реальном времени позволяет с высокой точность позиционировать медицинский инструмент, что снижает вероятность врачебной

ошибки и негативных послеоперационных последствий. Также это позволит обеспечить обратную связь для роботизированной системы доставки, что в свою очередь позволит автоматизировать проведение вмешательства.

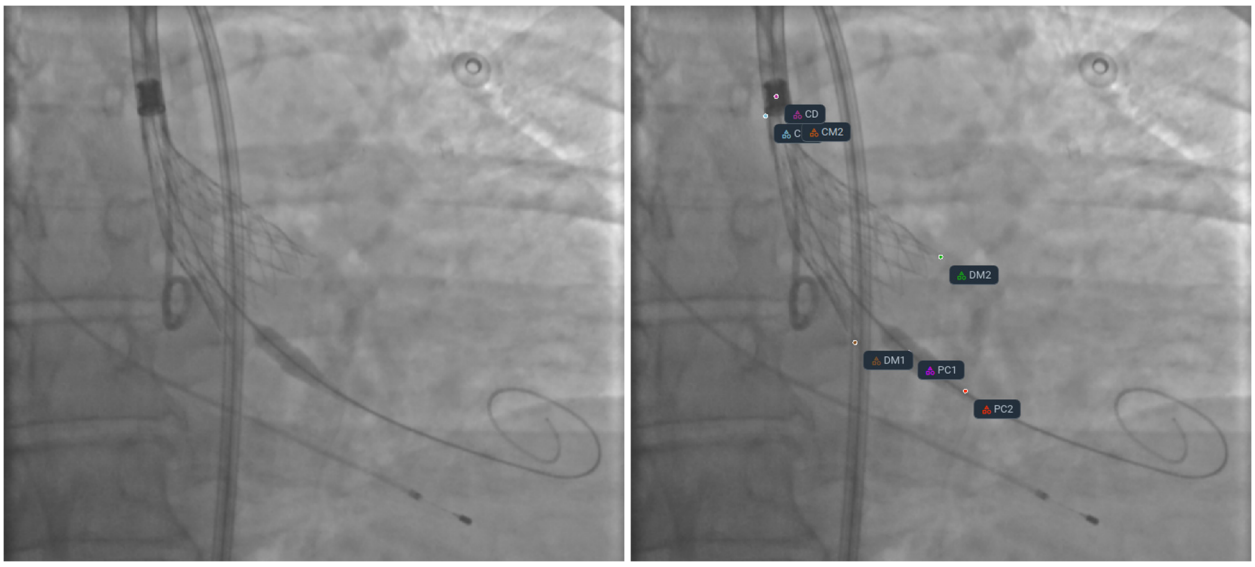


Рисунок 2 — Маркировка инструмента и анатомических ориентиров: слева – изображение без маркировки; справа – изображение с маркировкой

Система доставки

Второй не менее важной задачей является разработка роботизированной системы доставки, которая позволит точно и безопасно осуществлять манипуляции на движущихся структурах на значительном расстоянии от точки входа катетера, упредит повреждения мягких тканей при проведении вмешательств, снизит послеоперационные осложнение и тем самым ускорит реабилитацию пациентов. Роботизированная система для протезирования клапана аорты представляет собой многофункциональное устройство, которое обеспечивает процесс введения, управляемого протезирования и извлечения катетера из организма.

Предложенная роботизированная система доставки конструктивно состоит из двух основных блоков - позиционирования и инструментального. Такое разделение обусловлено многоэтапным характером выполнения процедуры.

Блок позиционирования осуществляет простое продольное перемещение медицинского устройства через сердечно-сосудистую систему вдоль линии тела пациента. Блок инструмента представляет собой быстросъемную оснастку, обеспечивающую автоматическое управление катетером, который в нее установлен. Конструкция блока зависит от функционала и конструкции конкретного катетера. На данный момент планируется использование двух медицинских устройств: баллонного катетера и катетера со стентом. Съем и установка блока инструмента на блок линейного перемещения и самого инструмента в блок должна быть максимально простой.

Особое внимание при разработке роботизированной системы уделяется методам навигации и управления. В свою очередь для навигации и управления системой разрабатываются методы, описывающая поведение гибкого тела катетера, что позволяет решать, как прямую задачу кинематики и рассчитывать перемещение дистального конца катетера, так и обратную задачу кинематики (в частности, расчет перемещения, которое нужно совершить катетеру для достижения определенной точки) [5].

На данным момент точным и одновременно не ресурсоёмким способом моделирования тела катетера является использование допущения о кусочно-постоянной кривизне [6]. Это допущение говорит о том, что тело катетера можно разбить на несколько участков, каждому из которых соответствует своя жесткость. Недостатком является то, что даже с чертежами не всегда возможно правильно подобрать параметры, описывающие робота. Авторами предложен метод, позволяющий определить параметры катетера, описанного допущением о кусочно-постоянной кривизне. Для этого необходимо получиться рабочую область катетера. Сделать это можно, изгибая катетер и отслеживая положение наконечника катетера с алгоритмов технического зрения. Затем нужно решить задачу оптимизации методом решетчатого поиска, подбираются параметры устройства таким образом, чтобы полученная с их помощью теоретическая рабочая область соответствовала рабочей области реального устройства. Результаты компьютерного моделирования приведены на рисунке 3.

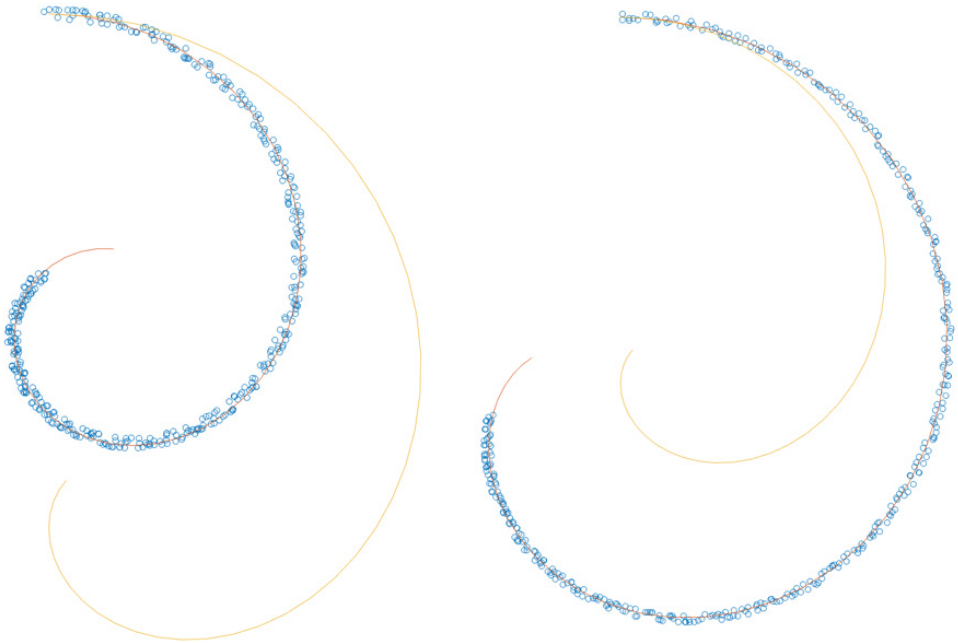


Рисунок 3 — Подбор параметров для различных облаков точек, описывающих рабочую область устройства: синие точки – облако точек, описывающие рабочую область робота; красная кривая – кривая с подобранными параметрами; желтая кривая – начальная кривая (одинаковая во всех случаях)

Литература

1. Сердечно-сосудистые заболевания [Electronic resource]. URL: https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/cardiovascular-diseases-(cvds) (accessed: 01.11.2024).
2. Kolpashchikov D., Gerget O., Meshcheryakov R. Robotics in healthcare //Handbook of Artificial Intelligence in Healthcare: Vol 2: Practicalities and Prospects. – 2022. – С. 281-306.
3. Chitwood Jr W. R. Historical evolution of robot-assisted cardiac surgery: a 25-year journey //Annals of Cardiothoracic Surgery. – 2022. – Т. 11. – №. 6. – С. 564.
4. Ramadani A. et al. A survey of catheter tracking concepts and methodologies //Medical image analysis. – 2022. – Т. 82. – С. 102584.
5. Колпащиков, Д. Ю. Метод и алгоритмы обратной кинематики и планирования движения для многосекционных непрерывных роботов : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Колпащиков Дмитрий Юрьевич, 2023. – 126 с.
6. Kolpashchikov D., Gerget O., Danilov V. FABRIKx: Tackling the inverse kinematics problem of continuum robots with variable curvature //Robotics. – 2022. – Т. 11. – №. 6. – С. 128.

Информация об авторах

Колпащиков Дмитрий Юрьевич, к.т.н., с.н.с., Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова Российской академии (ИПУ РАН), Россия, 117997, Москва, ул. Профсоюзная, д. 65, d.y.kolpashchikov@gmail.com, ORCID: 0000-0001-8915-0918

Гергет Ольга Михайловна, доцент, д.т.н., в.н.с., ИПУ РАН, Россия, 117997, Москва, ул. Профсоюзная, д. 65, olgagerget@mail.ru, ORCID: 0000-0002-6242-9502

О перспективах применения умных ортопедических имплантов

А.И. Мельникова[1]✉, А.В. Синегуб[2]
[1]*Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (ФГАОУ ВО СПбПУ), Санкт-Петербург, Россия, melnikova2.ai@mail.ru*
[2]*ООО «Ньюстеп», г Гатчина, Россия, a.sinegub@yandex.ru*

Аннотация
Современная медицина стремительно развивается, и одним из ключевых направлений является создание интеллектуальных имплантатов. Сегодня каждый год в мире проводится несколько миллионов операций с использованием ортопедических имплантатов. В 2018 году FDA обозначила интеллектуализацию имплантатов как один из главных вызовов 21 века. Интеллектуальные имплантаты – это устройства, способные не только обеспечивать основную функцию, но и дополнительно анализировать показания здоровья пациента или состояние ресурса имплантата. Интеллектуальные имплантаты позволяют измерять давление, силу, деформацию, напряжения, смещения, температуру, положение, ускорение, pH и другие параметры. На основе этих данных можно делать выводы о состоянии пациента, корректировать курс реабилитации и отслеживать стабильность имплантата. Основная цель данной статьи – описать перспективы и планы по разработке тотального эндопротеза коленного сустава с силомоментной обратной связью, выполняющий дополнительную функцию непрерывного мониторинга биомеханических показателей пациента для анализа и коррекции персонализированного лечения к июню 2025 года. В задачи входит разработка конструкции прототипа имплантата, его электрической схемы, программного обеспечения с выводом в виде графиков, оформление проекта в виде дипломной работы бакалавра.

Ключевые слова
Тотальное эндопротезирование коленного сустава, интеллектуальный имплант, реабилитация, эндопротез, датчик, коленный сустав, ортопедия, мониторинг пациентов, обратная связь.

About the prospects of using smart orthopedic implants

Anastasia I. Melnikova[1]✉, Andrey V. Sinegub[2]
[1]*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU), St. Petersburg, Russia, melnikova2.ai@mail.ru*
[2]*OOO «Newstep», St. Petersburg, Russia, a.sinegub@yandex.ru*

Abstract
Modern medicine is developing rapidly, and one of the key areas is the creation of intelligent implants. Today, several million operations using orthopedic implants are performed in the world every year. In 2018, the FDA designated the intellectualization of implants as one of the main challenges of the 21st century. Intelligent implants are devices capable of not only providing the main function, but also additionally analyzing the patient's health indications or the state of the implant resource. Intelligent implants allow you to measure pressure, force, deformation, stresses, displacements, temperature, position, acceleration, pH and other parameters. Based on these data, it is possible to draw conclusions about the patient's condition, adjust the rehabilitation course and monitor the stability of the implant. The main goal is to develop a total knee arthroplasty with force-moment feedback, which performs an additional function of continuous monitoring of the patient's biomechanical parameters for analysis and correction of personalized treatment by June 2025. The tasks include the development of a prototype implant design, its electrical circuit, software output in the form of graphs, and the design of the project in the form of a bachelor's thesis.

Key words
Total knee arthroplasty, smart implant, rehabilitation, prosthesis, sensor, knee sheer, orthopedic, patient monitoring.

Введение

Современная медицина активно развивается в области ортопедии, и основным фактором является рост распространенности дегенеративных заболеваний, таких как остеоартрит. По данным ВОЗ, количество операций по замене коленного сустава ежегодно увеличивается. При позднем выявлении заболевания консервативные методы лечения становятся неэффективными, что приводит к необходимости хирургического вмешательства и установки эндопротезов. В мире проводится миллионы операций с ортопедическими имплантатами, что подчеркивает важность разработки более эффективных и долговечных решений.

В 2018 году FDA обозначила интеллектуализацию имплантатов как один из главных вызовов 21 века. Интеллектуальные имплантаты способны не только выполнять функцию эндопротеза, но и анализировать здо-

ровье пациента и состояние импланта. На основе анализа существующих подходов и материалов будет проведено НИР с целью разработки решений для улучшения качества жизни, сокращения времени реабилитации и снижения числа повторных операций.

Планируется создание прототипа интеллектуального импланта с технологиями сенсорных датчиков и обратной связи в реальном времени. В настоящее время отсутствуют комплексные решения для внедрения умных устройств в эндопротезирование, что подтверждает актуальность данной темы.

Актуальность

В 2020 году от остеоартрита страдало 595 миллионов человек, что составляет 7,6 % от населения Земли. По прогнозам, к 2050 году случаи остеоартрита коленного сустава вырастут на 74,9% [1]. Ежегодно выполняется около 2 миллионов операций по замене крупных суставов, и, согласно ВОЗ, к 2030 году это число превысит 4 миллиона [2]. Ортопедические имплантаты минимизируют боль и восстанавливают механические функции организма, что способствует росту спроса на эндопротезирование и развитию технологий.

Тотальное эндопротезирование коленного сустава (ТЭКС) используется на поздних стадиях остеоартрита. Износ имплантов и воспалительные процессы требуют послеоперационного мониторинга для избегания повторных ревизий. Однако традиционные методы визуализации и самостоятельное наблюдение не дают точных данных о воспалениях, состоянии мягких тканей и нагрузках на импланты. Информация о силах и изменениях в костях и суставах поможет лучше понять биомеханику суставов для повышения эффективности эндопротезирования [3].

Недостатки существующих имплантов

По статистике, почти 20% пациентов, перенесших операцию, недовольны результатом [4]. К основным недостаткам классического эндопротезирования относятся отсутствие обратной связи о состоянии импланта, нестабильность, его износ, нехватка постоянного врачебного контроля и доступной информации.

Усилия и изменения в коленном суставе после эндопротезирование могу напрямую влиять на стабильность импланта, ремоделирование опорных костей и нарушение интерфейса взаимодействия между эндопротезом и организмом. Также к раннему износу эндопротеза относятся неправильная установка импланта, хирургические ошибки во время операции, увеличение массы тела пациента и чрезмерная нагрузка на эндопротез. Расшатывание имплантата влечет за собой инфекционные осложнения и выход из строя внедренного механизма. Все это противоречит должной реабилитации и восстановлению функций коленного сустава [3].

Трение компонентов эндопротеза вызывает высвобождение мельчайших частиц искусственных материалов, которые в свою очередь попадают в ткани и внутреннюю среду организма. Это приводит к нарушению процесса обмена веществ костной ткани вокруг имплантата, нарушению кровообращения, образованию воспалительных процессов и в конечном счете отмиранию окружающих клеток. На восстановление после операции уходит от 3 до 12 месяцев, в зависимости от скорости протекания реабилитации и наличия осложнений [3].

Все вышеперечисленные недостатки существующих имплантатов не только приводят к отказу имплантата, но также могут потребовать проведение ревизионного эндопротезирования [3]. Поэтому так необходима система мониторинга в режиме реального времени, способная оценивать на ранних этапах наступающие нежелательные явления. Для клиник информация с имплантатов может послужить доказательством при решении юридических вопросов. Благодаря данной технологии можно предотвратить потенциальные риски и рецидивы болезни.

Постановка задачи по SMART

Разработать прототип тотального эндопротеза коленного сустава с силомоментной обратной связью, выполняющий дополнительную функцию непрерывного мониторинга биомеханических показателей пациента, для контроля качества лечения и стабильности имплантата. Данные должны выводиться в виде графиков с погрешностью не более 10%. Проект будет реализован с использованием Arduino, SolidWorks, 3D-печати к июню 2025 года.

Преимущества решения

Вовлеченность пациента в лечение является ключевым фактором для успешного ТЭКС. Технология интеллектуальных датчиков с обратной связью может применяться на трех стадиях: интраоперационной, послеоперационной и реабилитационной, что улучшает результаты медицинской помощи и повышает эффективность здравоохранения [4].

Роботизированная технология во время операции позволяют выполнить объективную «оценку баланса связок и мягких тканей, сохраняя при этом сагиттальное и корональное выравнивание для достижения желаемых кинематических целей после тотального эндопротезирования коленного сустава», что способствует более точной установке импланта и снижает вероятность повреждений [4; 5]. Анализ данных, полученных в процессе операции, помогает усовершенствовать конструкции имплантатов и улучшать терапевтические методы лечения [4].

В период восстановления датчики фиксируют различные сигналы (давление, силу, деформацию, температуру и т.д.). На основе этих данных можно делать выводы о состоянии пациента, корректировать курс реабилитации и отслеживать стабильность имплантата и создавать персонализированные конструкции интеллектуальных имплантов, которые позволят достичь сбалансированного состояния коленного сустава. Раннее выявление осложнений снижает количество повторных операций и обеспечивает экономичность для пациентов [4].

Будущее интеллектуальных имплантатов заключается в самодиагностике и автоматической доставке лекарств для улучшения реабилитации [4]. Совместная работа хирургов и пациентов при внедрении этой технологии окажет значительное влияние на развитие эндопротезирования.

Состав изделия:

- бедренный компонент;
- большеберцовый компонент;
- полиэтиленовый вкладыш;
- силомоментные датчики;
- система передачи данных;
- система обработки данных;
- элементы питания и преобразования тепловой энергии в электрическую.

Мировой опыт

В ранних разработках умных имплантатов использовались проводные датчики, что ограничивало их практическое применение. Постепенно стали разрабатывать беспроводные датчики, а в будущем планируются разработки сенсорных устройств, которые будут в "спящем" режиме до обнаружения аномалий.

Первый беспроводной умный имплант — телеметрический дистальный эндопротез бедренной кости, имплантированный двум пациентам в 1995 году на 2,5 года. Он мог измерять продольную осевую силу, крутящий момент и два изгибающих момента, позволяя оценивать силы в коленном суставе. Датчики размещались в титановой полости, а электропитание обеспечивалось через внешнюю катушку индуктивности, которая также использовалась для беспроводной связи [6].

В последующем исследовании Кауфман и др. описали конструкцию коленного сустава с четырьмя одноосевыми датчиками нагрузки, расположенными между коленным суставом и дополнительным вкладышем [7]. Однако это устройство не могло измерять передний сдвиг и осевой крутящий момент, что привело к тому, что в 2001 году был разработан имплант, который мог измерять передний сдвиг и осевой крутящий момент. В состав изделия входили 4 тензодатчика, микропередатчик и антенна, питающиеся от внешней индукционной катушки. Конструкция была успешно имплантирована одному пациенту, и результаты опубликованы в 2005 году. Позже группа усовершенствовала устройство до второго поколения, добавив 12 тензодатчиков для измерения деформации в стержне тибиального лотка и определения сил и моментов. Это устройство было успешно имплантировано трём пациентам и использовалось для оценки сил при ходьбе, беге, езде на велосипеде, теннисе и гольфе [8]. Примерно в то же время Хайнлайн и др. разработали компонент для большеберцовой кости, способный измерять шесть компонентов нагрузки (три силы и три момента), передаваемых от бедренной кости к большеберцовой. Конструкция Хайнлайна была имплантирована девяти пациентам и легла в основу базы данных OrthoLoad [9].

Имплантируемые датчики широко используются для измерения контактных усилий в суставах во время повседневной деятельности. Фрегли и др. (2009) протестировали силу медиального контакта коленного сустава у пациента и заметили, что, когда пациент пользовался тростью, эта сила была уменьшена на 27% при положении стоя и на 16% при ходьбе, в сравнении с действиями без трости. Однако преимущества использования трости зависели от того, с какой стороны она использовалась. Ходьба с контралатеральными ручными костылями привела к снижению силы контакта с коленом на 43%, в то время как ходьба с ипсилатеральными ручными костылями привела к увеличению силы контакта в среднем на 9% [10][11].

В 2009 году компания Warsaw Orthopedic Inc получила патент US7474223B2. Система может отслеживать, осматривать и верифицировать хирургические имплантаты, чтобы оценивать любой износ имплантатов и/или смещение положения компонентов имплантата за счет RFID-датчика, который передает сигнал обратно на считывающее устройство [12].

В 2014 году Форшеле и др. разработали инструментальную вставку для измерения сил на протез коленного сустава. Вставка включает печатные платы и пьезорезистивный датчик деформации для каждого мыщелкового отдела. Датчик протестирован в механическом симуляторе коленного сустава, подтвердив способность измерять силы, в 1,5 раза превышающие вес тела, с необходимой чувствительностью [13].

В 2017 году Сафаи и др. представили коленный сустав с четырьмя встроенными пьезоэлектрическими датчиками для измерения давления и автономного питания. Исследованы усталостная прочность подшипника и электромеханические характеристики компонентов. При нагрузочном резисторе 1 МОм достигалось пиковое напряжение 3 В, а при 171 кОм — пиковая мощность 5,5 мВт. Они оценили распределение пьезоэлектрических датчиков на подшипнике с помощью анализа методом конечных элементов. Максимальная погрешность устройства составляет 2,6% [14].

В 2021 году Лавдас и др. имплантировали встроенный датчик в прокладки из костного цемента в бедренную кость трупа. Разработанная телеметрическая сенсорная система измеряла температуру коленного сустава с высокой точностью [15].

В 2021 году компания Zimmer Biomet представила интеллектуальный коленный имплантат Persona IQ с встроенными датчиками и системой телеметрии, срок службы которой составляет не менее 10 лет. Однако аккумулятор работает лишь 2 года и 2 месяца, обеспечивая только периодические измерения. Данные используются для оценки активности, но Persona IQ требовла 58 мм пространства для электроники, что ограничивало использование у маленьких пациентов из-за необходимости дополнительной резекции кости и изменения ориентации имплантата. На данный момент компания развивает продукт, увеличив линейку размеров и разработав мобильное приложение для ежедневной передачи данных о состоянии импланта и пациента совместно с Canary Medical [16].

Методика испытаний

Испытания прототипа интеллектуального импланта будут проводиться в лабораторных условиях с целью проверки его работоспособности. Во время тестирования будет проверена функциональность прототипа при различных типах движений и нагружений. Полученные данные о нагрузках должны быть с погрешность не более 10%, отображаться на графиках корректно и своевременно обновляться.

Данное испытание позволит сравнить ожидаемые показатели с полученными, выявить возможные проблемы и области для модернизации прототипа.

После испытания прототипа будет проводиться клиническая апробация, с использованием имплантата как индивидуального средства реабилитации.

План по испытаниям

1. Разработанная титановая модель будет загружена в SolidWorks Simulation для анализа ее поведения под различными нагрузками и функциональности конструкции;
2. Первичное тестирование прототипа на выявление возможных недостатков и сбоя программы;
3. Дальнейшие испытания модернизированного прототипа.

Метод изготовления

В медицине аддитивное производство (АМ) широко используется для изготовления имплантов, протезов и хирургических инструментов благодаря своим технологическим преимуществам. АМ — это процесс создания деталей слоем за слоем. Существуют различные технологии АМ, различающиеся по материалам, методам наложения слоев и областям применения.

Прототип импланта будет изготовлен с помощью FDM (Fused Deposition Modeling) печати, которая накладывает расплавленный термопласт слой за слоем. Эта технология отличается простотой, доступностью и возможностью быстрого прототипирования с высокой точностью, и сложными формами. Для печати необходимо создать 3D модель импланта в CAD-программе, экспортировать её в формате STL, настроить параметры печати и отправить файл на 3D принтер.

Имплантат для клинической апробации будет изготавливаться из Ti6Al4V ELI с использованием SLM (Selective laser melting) печати, а вкладыш из сверхмолекулярного полиэтилена.

Заключение

Разработка интеллектуального импланта представляет собой шаг вперед в медицине, улучшая функциональность и качество жизни пациентов. Применение современных технологий открывает новые горизонты для персонализированного лечения и дальнейших исследований в этой области.

Литература

1. Steinmetz J. D. et al. Global, regional, and national burden of osteoarthritis, 1990–2020 and projections to 2050: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2021 //The Lancet Rheumatology. – 2023. – Vol. 5. – № 9. – PP. e508-e522.

2. Герасименко М.А., Жук Е.В., Третьяк С.И. Клинический случай эндопротезирования коленного сустава у пациента с ампутационной культей голени. – 2015.

3. Wang J., Chu J., Song J. et al. The application of impantable sensors in the musculoskeletal system: a review //Frontiers in Bioengineering and Biotechnology. – 2024. – Vol. 12. – P. 1270237.

4. Iyengar K.P., Gowers B.T.V., Jain V.K et al. Smart sensor implant technology in total knee arthroplasty //Journal of clinical orthopaedics and trauma. – 2021. – Vol. 22. – P. 101605.

5. Liu P., Lu F. F., Liu G. J., et al. Robotic-assisted unicompartmental knee arthroplasty: a review //Arthroplasty. – 2021. – Vol. 3. – PP. 1-10.

6. Taylor S.J.G., Walker P.S. Forces and moments telemetered from two distal femoral replacements during various activities //Journal of biomechanics. – 2001. – Vol. 34. – № 7. – PP. 839-848.

7. Kaufman K. R. et al. Instrumented implant for measuring tibiofemoral forces //Journal of biomechanics. – 1996. – Vol. 29. – № 5. – PP. 667-671.
8. Kirking B. et al. A multiaxial force-sensing implantable tibial prosthesis //Journal of biomechanics. – 2006. – Vol. 39. – № 9. – PP. 1744-1751.
9. Heinlein B. et al. Design, calibration and pre-clinical testing of an instrumented tibial tray //Journal of biomechanics. – 2007. – Vol. 40. – PP. S4-S10.
10. Fregly B. J., D'Lima D. D., Colwell Jr C. W. Effective gait patterns for offloading the medial compartment of the knee //Journal of orthopaedic research. – 2009. – Vol. 27. – № 8. –PP. 1016-1021.
11. D'Lima D. D. et al. Knee joint forces: prediction, measurement, and significance //Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine. – 2012. – Vol. 226. – № 2. – PP. 95-102.
12. US7474223B2, United States, Jeffrey H. NyczSteven M. TethrakeMark PeloRobert VarnerPaul Elliott, Method and apparatus for implant identification
13. Forchelet D. et al. Enclosed electronic system for force measurements in knee implants //Sensors. – 2014. – Vol. 14. – № 8. – PP. 15009-15021.
14. Safaei M., Meneghini R. M., Anton S. R. Parametric analysis of electromechanical and fatigue performance of total knee replacement bearing with embedded piezoelectric transducers //Smart materials and Structures. – 2017. – Vol. 26. – № 9. – P. 094002.
15. Lavdas M. K. et al. Embedded sensing package for temporary bone cement spacers in infected total knee arthroplasty //Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials. – 2021. – Vol. 115. – P. 104301.
16. OrthopedicDesign&Technology. First knee replacement surgery with persona IQ smart knee: orthopedic design & technology; 2022 [Электронный ресурс]. URL: https://www.odtmag.com/contents/view_breaking-news/2021-10-13/first-knee-replacement-surgery-with-persona-iq-smart-knee/ (дата обращения: 21.02.2006).

Информация об авторах

Мельникова Анастасия Игоревна, студент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (ФГАОУ ВО СПбПУ), Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, литера Б, melnikova2.ai@mail.ru

Синегуб Андрей Владимирович, к.т.н., генеральный директор ООО «Ньюстеп», Россия, 188300, Ленинградская область, г. Гатчина, Пушкинское ш, д. 20, к. 1, пом. 2.2, a.sinegub@yandex.ru, ORCID: 0000-0003-2619-3691

Двухслойные медицинские фантомы позвонков с регулируемыми характеристиками путём изменения состава применяемых материалов

М.Э. Коновалов[1]✉, А.А. Воротников[1,2], Е.О. Лопухов[1,2], Ю.В. Подураев[1,2], А.А. Гринь[1,3,4], О.В. Левченко[1]

[1]Российский Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский Университет Медицины» Министерства здравоохранения Российской Федерации (ФГБОУ ВО Российский Университет Медицины Минздрава России), Москва, Россия, maxkonovalov1998@yandex.ru
[2]Московский Государственный Технологический Университет «СТАНКИН» (МГТУ «СТАНКИН»), Москва, Россия
[3]НИИ скорой помощи им. Н.В. Склифосовского (НИИ СП им. Н.В. Склифосовского ДЗМ), Москва, Россия
[4]Департамент здравоохранения города Москвы, Москва, Россия,

Аннотация
В статье представлена разработка и изготовление двухслойных медицинских фантомов позвонков, направленных на применение в роботизированной хирургии и повышение качества обучения медицинского персонала проведению транспедикулярной фиксации позвоночника. Описана технология изготовления фантомов, позволяющая регулировать их механические характеристики путём изменения состава материалов для адаптации под различные типы костной ткани. Были проведены испытания материала изготовления фантомов посредством введения метчика и транспедикулярного винта с оценкой зависимости крутящего момента от глубины захода инструмента. Приведены результаты соответствия характеристик материалов фантомов костной ткани, что обеспечивает реалистичные тактильные ощущения при хирургических манипуляциях.

Ключевые слова
Роботизированная хирургия, медицинские фантомы, транспедикулярная фиксация.

Two-layer medical vertebral phantoms with variable characteristics by changing the composition of the materials used

Maxim E. Konovalov[1]✉, Andrey A. Vorotnikov[1,2], Evgenii O. Lopukhov[1,2], Yuri V. Poduraev[1,2], Andrey A. Grin[1,3,4], Oleg V. Levchenko[1]

[1]Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Russian University of Medicine» of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation (Russian University of Medicine), Moscow, Russia, Maxkonovalov1998@yandex.ru
[2]Moscow State Technological University «STANKIN» (MSTU «STANKIN»), Moscow, Russia
[3]Sklifosovsky Research Institute For Emergency Medicine (Sklifosovsky Institute), Moscow, Russia
[4]Moscow Healthcare Department, Moscow, Russia

Abstract
The article presents the development and production of two-layer medical phantoms of vertebrae aimed at application in robotic surgery and improving the quality of training of medical personnel in transpedicular fixation of the spine. The technology of manufacturing phantoms is described, allowing to regulate their mechanical characteristics by changing the composition of materials for adaptation to different types of bone tissue. Tests of the material of manufacturing phantoms were conducted by introducing a tap and a transpedicular screw with an assessment of the dependence of the torque on the depth of entry of the instrument. The results demonstrate the correspondence of the mechanical characteristics of the phantom materials to bone tissue, providing realistic tactile feedback during surgical manipulations.

Key words
Robotic surgery, medical phantoms, transpedicular fixation.

Введение

С целью повышения качества и безопасности проведения хирургических вмешательств, современная медицинская практика предъявляет высокие требования к качеству подготовки персонала. Одним из важных инструментов обучения молодых специалистов являются медицинские фантомы, представляющие собой анатомические модели органов, костных структур или тканей человека, предназначенные для обучения, тестирования и разработки новых медицинских технологий.

Существуют различные виды медицинских костных фантомов, каждый из которых предназначен для определенных целей и областей применений. Демонстрационные фантомы, отражающие анатомическую структуру и функциональные особенности костей человека широко используются студентами и медицинскими специалистами с целью изучения анатомии и предоперационного планирования. Как правило, такие фантомы

отличаются низкой стоимостью производства и высокой доступностью, что способствует их широкому распространению среди образовательных учреждений и клинических центров.

Однако, для обучения и повышения квалификации в области мануальных хирургических процедур необходимо использовать специализированные фантомы, имитирующие процесс работы с костными структурами при оперировании пациентов. Кроме того, такие фантомы могут играть важную роль в тестировании роботизированных медицинских систем и инновационных хирургических инструментов, что позволяет оценить их эффективность и безопасность до внедрения в клиническую практику. С развитием технологий роботизированной хирургии возникает потребность в медицинских фантомах, способных обеспечить достоверную обратную связь и воспроизведение тактильных ощущений, что критично для настройки и отладки подобных систем.

Например, транспедикулярная фиксация позвоночника является одним из ключевых методов стабилизации позвоночника, требующим высокой точности хирургических манипуляций. Залог проведения подобных операций качественно и безопасно для пациента – это многочисленные мануальные тренировки начинающего нейрохирурга, а проведение операций на пациентах возможно только под контролем опытного наставника и со строгим соблюдением всех этических и юридических норм [1-2].

В данной области наиболее предпочтительным для тренировок и обучения является человеческий кадаверный материал, который ограничен в количестве, в то время как кадаверный животный материал (свиной, бараний) не обеспечивает необходимое соответствие по форме и размерам. Также нет серьёзных научных работ, подтверждающих качество существующих коммерческих фантомов от компаний «Sawbones» и «Synbone», получивших распространение по всему миру для обучения нейрохирургов и проведения научных исследований и испытаний имплантов. Существующие исследования сообщают о несоответствии фантомов данных компаний по таким характеристикам, как момент введения и сила вытягивания транспедикулярного винта [3-4] качество тактильной обратной связи [5] и устойчивость винта в материале при циклических нагрузках [6].

Тактильная обратная связь при проведении хирургических манипуляций, таких как формирование резьбы метчиком и введение транспедикулярного винта в позвонки, имеет решающее значение для успешного исхода операции. Она позволяет хирургу ощущать сопротивление костной ткани, что способствует точному размещению винта и обеспечивает его стабильность. Это особенно важно для предотвращения потенциальных осложнений, таких как повреждение нервных структур или смещение имплантата. [4]

Целью данного исследования является разработка медицинских фантомов позвонков человека с регулируемыми характеристиками, позволяющими имитировать различные типы костной ткани.

Материалы и методы

Для изготовления медицинских фантомов позвонков были выбраны коммерчески доступные полимерные материалы, такие как двухкомпонентный литьевой полиуретан и двухкомпоненный литьевой пенополиуретан.

Медицинский фантом позвонка воспроизводит анатомическую структуру позвонка человека, включая его основные компоненты: тело позвонка, дугу, поперечные и остистые отростки, а также суставные поверхности, что обеспечивает высокую реалистичность модели. Структура фантома представляет собой двухслойную модель позвонка человека, состоящую из внутреннего слоя, воспроизводящего трабекулярную (губчатую) костную ткань, и внешнего слоя, имитирующего кортикальную костную ткань позвонка. Материалы изготовления внутреннего и внешнего слоев могут отличаться, что позволяет повысить имитационные свойства фантома при проведении хирургических тренировок и тестировании медицинских инструментов.

Для изготовления 3Д моделей медицинских фантомов позвонков были получены геометрические параметры внешнего и внутреннего слоёв позвонков поясничного отдела на основе анонимизированных DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine) данных пациентов. На основе полученных геометрических параметров были разработаны 3д модели для внутренних и внешних слоев позвонков поясничного отдела, при этом анатомическая структура внутреннего слоя была упрощена, а толщина кортикального слоя составила 2 мм. Важно отметить, что подобные анатомические фантомы могут быть разработаны с учетом индивидуальных анатомических особенностей конкретного пациента, что может значительно повысить эффективность предоперационного планирования.

С помощью фотополимерной 3Д-печати были получены мастер-модели внешнего (кортикального) и внутреннего (трабекулярного) слоёв фантома поясничного позвонка L5, представленные на рисунке 1а, 1б). Эти модели послужили основой для изготовления двухслойных силиконовых литьевых форм, приведенных на рисунке 1в.

Процесс изготовления медицинского двухслойного фантома позвонка заключался в последовательной отливке внутреннего и внешнего слоя фантома. После заливки и полной полимеризации внутреннего слоя фантома из смеси двухкомпонентного литьевого полиуретана и двухкомпонентного литьевого пенополиуретана, он размещался в форму для отливки внешнего слоя таким образом, чтобы обеспечить его точное позиционирование и надежную фиксацию, что необходимо для предотвращения смещения или деформации внешнего слоя во время процесса изготовления.

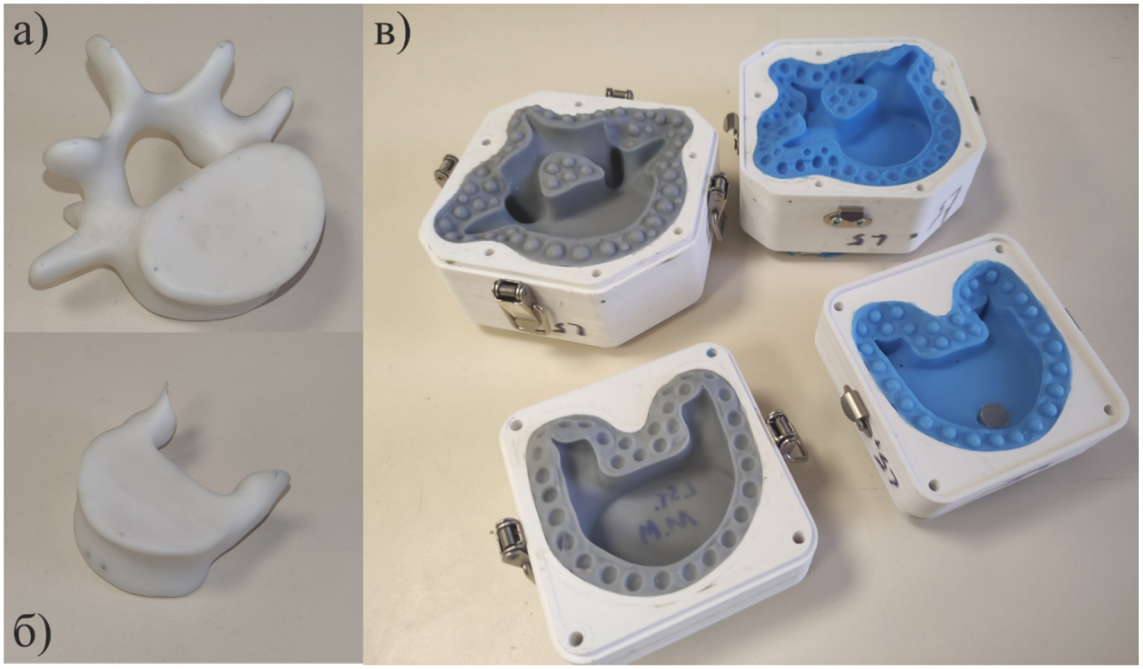


Рисунок 1 — Мастер модели внешнего (а) и внутреннего (б) слоев фантома позвонка L5, силиконовые двухсоставные литьевые формы вешнего и внутреннего слоев фантома позвонка L5 (в)

Внешний слой фантома из смеси двухкомпонентного полиуретана, имитирующий кортикальную костную ткань позвонка, заливался в силиконовую форму таким образом, чтобы полностью охватить внутренний слой, распложенный в форме, образовывая при этом монолитную структуру и имитируя анатомические особенности позвонка. После полной полимеризации внешнего слоя, двухслойный фантом позвонка аккуратно извлекался из силиконовой формы и отчищался от следов литья.

Внутренний слой фантома, имитирующий трабекулярную костную ткань, изготавливался методом литья в силиконовую форму композиции, состоящей из двух компонентов литьевого полиуретана (А1 – 100 частей и Б1 — 90 частей) и двух компонентов литьевого пенополиуретана (А2 — 1 часть и Б2 — 2 части). В отличие от полимеризации полиуретана, при которой выделяется только тепло, полимеризация пенополиуретана сопровождается выделением тепла и углекислого газа, что способствует формированию ячеистой структуры, имитирующей трабекулярную костную ткань.

Материалы для внутреннего слоя фантома исследовались при следующих соотношениях компонентов А2 и Б2 в общей смеси: 25%, 30%, 35%, 40%, 45% и 50%. Увеличение доли компонентов литьевого пенополиуретана А2 и Б2 в общей смеси приводило к повышению интенсивности вспенивания состава во время полимеризации, что, в свою очередь, приводило к повышению пористости материала полимеризации.

Большинство существующих на сегодняшний день методик оценки хирургических фантомов костной ткани позвонка основаны на классических испытаниях по растяжению, сжатию или кручению образцов этих материалов [7-12], сравнению их микроструктуры с костной тканью по различным параметрам, посредством цифрового микроскопа [13-15] и методиках, основанных на измерении силы сопротивления при введении в образцы материала деформирующего инструмента (сверла, фрезы, иглы и т.п.) [16-18]. Все описанные ранее методы оценивают соответствие механических свойств и микроструктуры материала фантома костной ткани позвонков, однако не учитывают тактильные ощущения, которые возникают у хирурга при проведении операций.

Важным параметром материала, характеризующим сопротивление его деформированию, а, следовательно, и тактильные ощущения, которые чувствует хирург, при проведении хирургических манипуляций по транспедикулярной фиксации позвоночника является крутящий момент при формировании резьбы метчиком или введении транспедикулярного винта. Крутящий момент введения хирургического инструмента в позвонок характеризует стабильность транспедикулярного винта в позвонке [19-20], а также зависит от МНК (минеральной плотности кости) и параметров микроархитектуры позвонка [21-22].

С целью исследования материалов фантомов и костных тканей было разработано многофункциональное беспроводное устройство, предназначенное для мануального использования со вспомогательными хирургическими инструментами для хирургических манипуляций с костными тканями во время проведения операции по транспедикулярной фиксации позвоночника [23-24]. Выходными данными устройства является зависимость крутящего момента от глубины введения хирургического инструмента, при этом каждый из параметров отфильтрован, посредством разработанного алгоритма [25], для нивелирования мануальных погрешностей (перехватывание ручки устройства) и преобразования углового перемещения в линейное (посредством использования параметров хирургического инструмента).

Эксперимент по анализу характеристик фантомов позвонков включал в себя проведение хирургических манипуляций (по алгоритму: создание отверстия глубиной 3 мм хирургическим шилом, формирование резьбового канала глубиной 30 мм хирургическим метчиком и введение транспедикулярного винта на глубину 40 мм) с записью крутящего момента и расчётом глубины введения, после чего вычислялись статистические параметры каждой манипуляции. Для каждого исследуемого материала было выполнено по шесть экспериментов. Обработка данных экспериментов заключалась в преобразовании сырых данных с датчиков в отфильтрованную зависимость крутящего момента от глубины захода инструмента/винта и рассчитывались силовые параметры этой зависимости для каждой хирургической манипуляции (параметры средней линии – коэффициент наклона K и смещение b). Далее для каждого материала рассчитывалось среднее значение и среднее квадратическое отклонение.

Результаты

Результаты экспериментов показаны на рисунке Y, в виде графика зависимости средних линий исследуемых образцов материалов на графике зависимости крутящего момента от глубины захода хирургического метчика (а) и транспедикулярного винта (б).

Регулирование характеристик материалов фантомов основывается на линейном изменении силового параметра K в зависимости от исследуемого материала, что подтверждается высокими значениями коэффициента корреляции (для метчика R^2=0.996, для винта R^2=0.9962 при уровне значимости менее 5%) как показано на рисунке 2 для хирургических манипуляций с введением хирургического метчика (в) и транспедикулярного винта (г). Диапазон изменения силового параметра K для материалов фантомов входит в интервал изменения параметров костной ткани, которые находятся в пределах от 0.01 до 0.06 Н*м/мм.

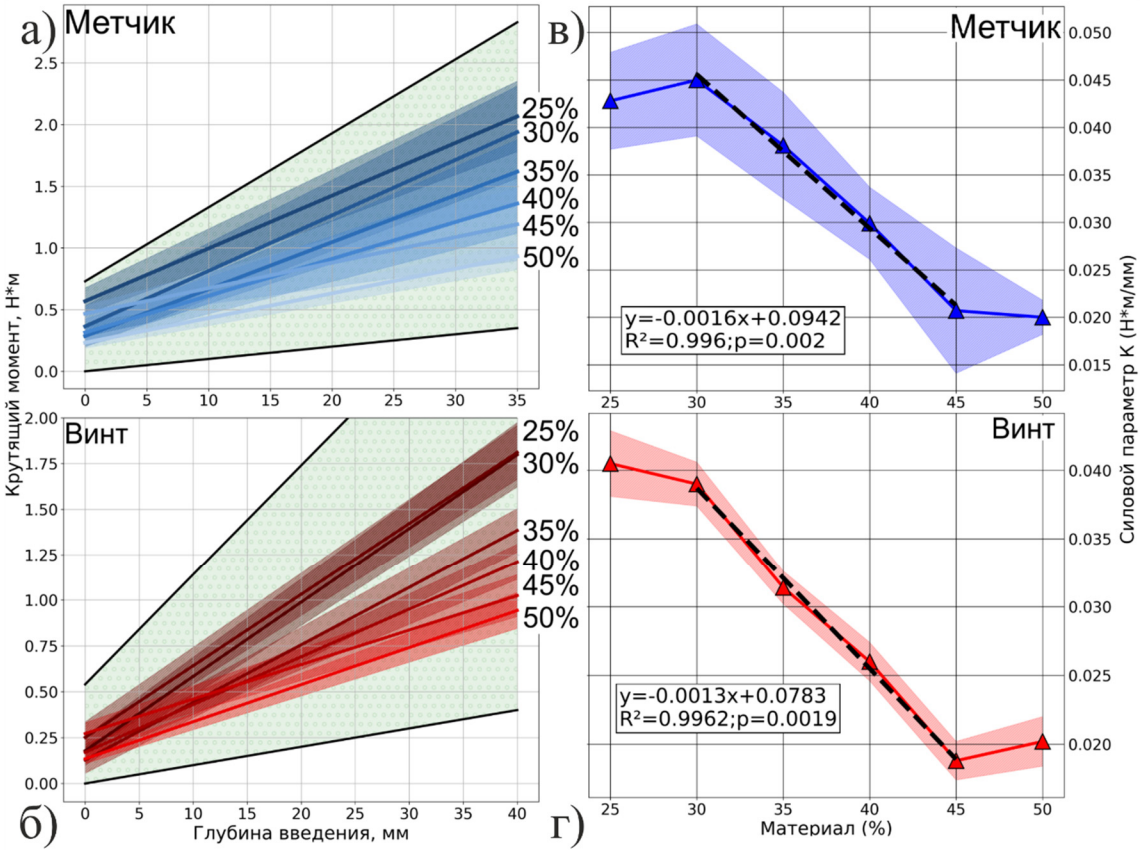


Рисунок 2 — График среднего значения силовых параметров при введении хирургического метчика (а) и транспедикулярного винта (б) для исследуемых образцов материалов фантомов. График зависимости среднего значения силового параметра K для исследуемых материалов фантомов при введении хирургического метчика (в) и транспедикулярного винта (г)

Следует отметить, что важным преимуществом разработанных медицинских фантомов является возможность имитации силовых параметров костной ткани конкретного пациента, что может быть достигнуто благодаря выбору состава материалов внутренних и внешних слоёв фантома. Такая возможность существенно повышает имитационные свойства костных фантомов для моделирования хирургических вмешательств, что в результате приводит к повышению качества и безопасности оказанию хирургических процедур и снижению риска осложнений.

Рисунок 3 — Двухслойные медицинские фантомы позвонков L4

Были разработаны и изготовлены двухслойные медицинские фантомы позвонков поясничного отдела позвоночника. Каждый фантом состоит из внешнего кортикального слоя и внутреннего трабекулярного слоя (см рис. 3), что обеспечивает высокую степень имитации анатомической структуры и тактильной обратной связи при проведении транспедикулярной фиксации позвоночника человека. Внешний кортикальный слой обладает высокой прочностью и устойчивостью к сжатию, аналогичной кортикальной костной ткани человека, тогда как внутренний слой характеризуется пористой структурой, воспроизводящей трабекулярную ткань, что обеспечивает универсальность и эффективность медицинских фантомов как в образовательных целях для обучения нейрохирургов, так и в тестировании роботизированных хирургических систем.

Полученные фантомы показали высокую степень соответствия реальным костным тканям по своим механическим характеристикам, что подтверждается результатами испытаний по введению хирургического метчика и транспедикулярного винта в образцы материалов.

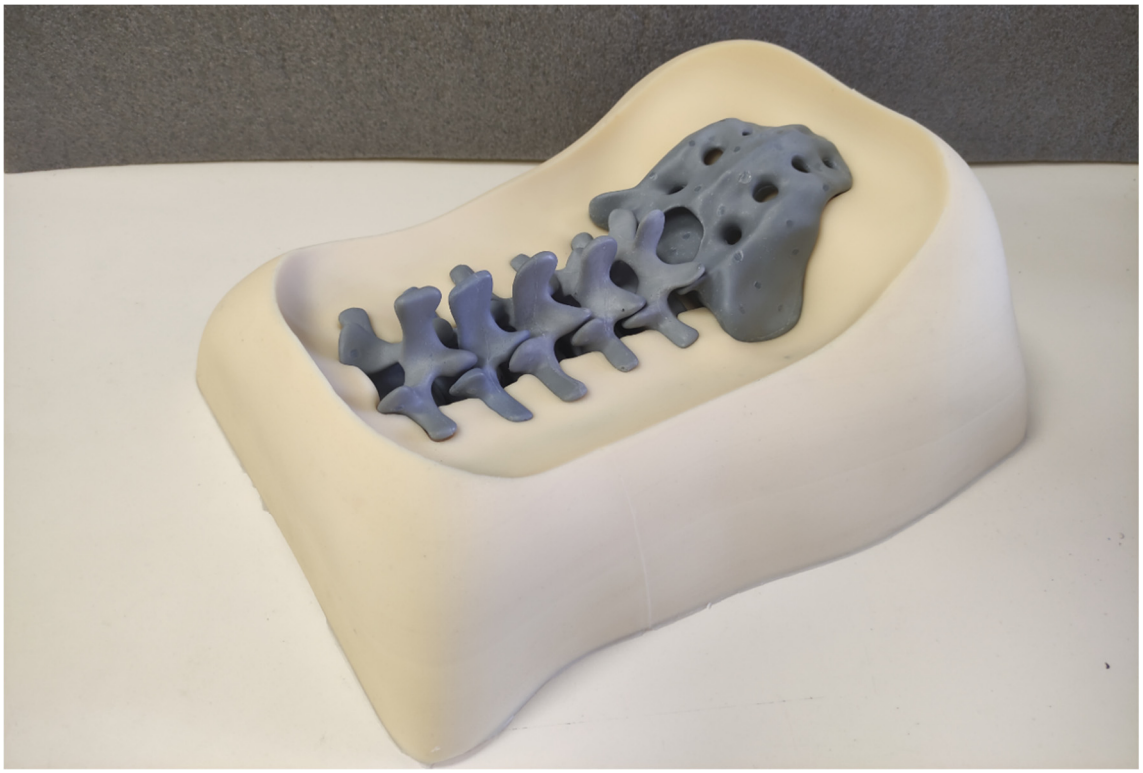


Рисунок 4 — Двухслойный медицинский фантом поясничного отдела позвоночника в ложементе

Для повышения реалистичности процесса отработки транспедикулярной фиксации медицинские фантомы позвонков могут быть собраны в фантомы отделов позвоночника с использованием специализированных фантомов межпозвоночных дисков, образуя, например, фантом поясничного отдела позвоночника. Кроме того, удобство проведения роботизированных или мануальных хирургических манипуляций на фантомных отделах позвонков повышается при размещении их в специализированных ложементах, разработанных индивидуально для каждого отдела позвоночника. На рисунке 4 представлен медицинские двухслойный фантом поясничного отдела позвоночника, установленный в специализированный ложемент.

Заключение

В рамках исследования были изготовлены двухслойные медицинские фантомы позвонков человека методом поэтапного литья в силиконовые формы. Были собраны позвоночные структуры, представляющие собой фантомные отделы позвоночника, состоящие из нескольких позвонков. Результаты экспериментального исследования разработанных двухслойных фантомов позвонков демонстрируют возможность их изготовления с варьируемыми характеристиками, обеспечивающими тактильную обратную связь при проведении хирургических манипуляций по транспедикулярной фиксации позвоночника, что позволяет имитировать различные типы костной ткани, существенно повышая реалистичность фантомов и эффективность обучения медицинского персонала.

Литература

1. Крылов В.В., Левченко О.В., Закондырин Д.Е. Практическая подготовка нейрохирургов в России. Часть 1. Проблемы и пути их решения // Нейрохирургия. 2017. № 1.

2. Крылов В.В., Левченко О.В., Закондырин Д.Е. Практическая подготовка нейрохирургов в России. Часть 2. Опыт и перспективы // Нейрохирургия. 2017. № 2.

3. Bredbenner TL, Haug RH. Substitutes for human cadaveric bone in maxillofacial rigid fixation research. Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod. 2000 Nov;90(5):574-80. doi: 10.1067/moe.2000.111025.

4. Tsuji M, Crookshank M, Olsen M, Schemitsch EH, Zdero R. The biomechanical effect of artificial and human bone density on stopping and stripping torque during screw insertion. J Mech Behav Biomed Mater. 2013 Jun;22:146-56. doi: 10.1016/j.jmbbm.2013.03.006.

5. Tomlinson JE, Yiasemidou M, Watts AL, Roberts DJ, Timothy J. Cadaveric Spinal Surgery Simulation: A Comparison of Cadaver Types. Global Spine J. 2016 Jun;6(4):357-61. doi: 10.1055/s-0035-1563724.

6. Becker EH, Kim H, Shorofsky M, Hsieh AH, Watson JD, O'Toole RV. Biomechanical Comparison of Cadaveric and Commercially Available Synthetic Osteoporotic Bone Analogues in a Locked Plate Fracture Model Under Torsional Loading. J Orthop Trauma. 2017 May;31(5):e137-e142. doi: 10.1097/BOT.0000000000000782.

7. Glinz, Jonathan & Kytyr, Dan & Fíla, Tomáš & Sleichrt, Jan & Schrempf, Andreas & Fuerst, David & Kastner, Johann & Senck, Sascha. (2019). IN-SITU COMPRESSION TEST OF ARTIFICIAL BONE FOAMS IN CONTROLLED ENVIRONMENT USING X-RAY MICRO-COMPUTED TOMOGRAPHY. Acta Polytechnica CTU Proceedings. 25. 48-51. doi: 10.14311/APP.2019.25.0048.

8. Hollensteiner, Marianne & Augat, Peter & Fuerst, David & Schempf, Andreas. (2018). Polyurethane-based Bone Surrogates mimic Human Vertebrae in Pedicle Screw Mechanics and Morphology.

9. Hollensteiner, Marianne & Esterer, Benjamin & Fuerst, David & Schrempf, Andreas & Augat, Peter. (2019). Development of open-cell polyurethane-based bone surrogates for biomechanical testing of pedicle screws. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials. 97. 247-253. 10.1016/j.jmbbm.2019.05.038.

10. Sleichrt, Jan & Kytyr, Dan & Pithartova, Katerina & Senck, Sascha & Fuerst, David & Schrempf, Andreas. (2018). BASIC BIOMECHANICAL CHARACTERIZATION OF POLYURETHANE BASED ARTIFICIAL CANCELLOUS STRUCTURES. Acta Polytechnica CTU Proceedings. 18. 28. 10.14311/APP.2018.18.0028.

11. Johnson AE, Keller TS. Mechanical properties of open-cell foam synthetic thoracic vertebrae. J Mater Sci Mater Med. 2008 Mar;19(3):1317-23. doi: 10.1007/s10856-007-3158-7. Epub 2007 Sep 20. PMID: 17882383.

12. Soltani, Navid & Bitter, Thom & Janssen, Dennis & Verdonschot, Nico. (2021). Development of a crushable foam model for human trabecular bone. Medical engineering & physics. 96. 53-63. 10.1016/j.medengphy.2021.08.009.

13. D. Fuerst, S. Senck, M. Hollensteiner, et al. Characterization of synthetic foam structures used to manufacture artificial vertebral trabecular bone. Materials Science and Engineering C 2017.

14. Szivek JA, Thomas M, Benjamin JB. Characterization of a synthetic foam as a model for human cancellous bone. J Appl Biomater. 1993 Fall;4(3):269-72. doi: 10.1002/jab.770040309.

15. Mi, Hao-Yang & Jing, Xin & Salick, Max & Cordie, Travis & Peng, Xiang-Fang & Turng, Lih-Sheng. (2013). Morphology, mechanical properties, and mineralization of rigid thermoplastic polyurethane/hydroxyapatite scaffolds for bone tissue applications: Effects of fabrication approaches and hydroxyapatite size. Journal of Materials Science. 49. doi: 10.1007/s10853-013-7931-3.

16. Hao, John & Nangunoori, Raj & Wu, Ying & Rajaraman, Mabaran & Cook, Daniel & Yu, Alexander & Cheng, Boyle & Shimada, Kenji. (2018). Material characterization and selection for 3D-printed spine models. 3D Printing in Medicine. 4. doi: 10.1186/s41205-018-0032-9.

17. Schulze C, Vogel D, Sander M, Bader R. Calibration of crushable foam plasticity models for synthetic bone material for use in finite element analysis of acetabular cup deformation and primary stability. Comput Methods Biomech Biomed Engin. 2019 Jan;22(1):25-37. doi: 10.1080/10255842.2018.1524884.

18. Feldmann, Arne & Schweizer, Marcel & Stucki, Simon & Nolte, Lutz. (2019). Experimental evaluation of cortical bone substitute materials for tool development, surgical training and drill bit wear investigations. Medical Engineering & Physics. 66. doi: 10.1016/j.medengphy.2019.02.010.

19. Bühler DW, Berleman U, Oxland TR, Nolte L-P. Moments and force during pedicle screw insertion. In vitro and in vivo measurements, 1998, 23:1220-122.
20. Addevico F, Morandi M, Scaglione M, Solitro GF. Screw insertion torque as parameter to judge the fixation. Assessment of torque and pull-out strength in different bone densities and screw-pitches 2020, 72: 130-135.
21. Rosidah A-L, Perilli E, Ryan MK, Costi JJ, Reynolds KJ. Does cancellous screw insertion torque depend on bone mineral density and/or microarchitecture? J of Biomech, 2014, 47: 347-353.
22. Matsukawa K, Yato Y, Kato T, et al. In Vivo Analysis of Insertional Torque During Pedicle Screwing Using Cortical Bone Trajectory Technique. Spine, 2014, 39.
23. Solovyev MA, Vorotnikov AA, Grin AA, et al. Experimental Validation of the Multifunctional Device for Measuring Forces and Torques on Spine Phantoms. In: Triwiyanto, Nugroho HA, Rizal A, Caesarendra W (eds.). Proc of the 1st Int Conf on Elect, Biomed Eng, and Health Informatics. Lecture Notes in Elect Eng vol 746, Surabaya, Indonesia, 2020, 343-353. DOI: 10.1007/978-981-33-6926-9_29.
24. Solovyev MA, Vorotnikov AA, Klimov DD, et al. Control System of the Articulated Arm Braking Mechatronic Machine (AABMM). In: Katalinic B (eds.). Proc of the 28th DAAAM Int Symp, Vienna, Austria, 2020, 1002-1009. DOI: 10.2507/28th.daaam.proceedings.139.
25. Lopukhov EO, Solovyev MA, Vorotnikov AA, et al. Torque from Length Dependence Analysis of Pedicle Screw Insertion under Spinal Fusion Procedure with Multifunctional Wireless Device. 2023 IEEE Ural-Siberian Conf on Biomed Eng, Radioelectronics and Inf Technol (USBEREIT), Yekaterinburg, Russian Federation, 2023, 56-59. DOI: 10.1109/USBEREIT58508.2023.10158879.

Информация об авторах

Коновалов Максим Эдуардович, м.н.с., подразделение НИИ «Технобиомед», Российский Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский Университет Медицины» Министерства здравоохранения Российской Федерации (ФГБОУ ВО Российский Университет Медицины Минздрава России), Россия, 127006, Москва, ул. Долгоруковская, д. 4, maxkonovalov1998@yandex.ru, ORCID: 0000-0003-4072-0777

Воротников Андрей Александрович, н.с., подразделение НИИ «Технобиомед», ФГБОУ ВО Российский Университет Медицины Минздрава России, Россия, 127006, Москва, ул. Долгоруковская, д. 4; старший преподаватель, Институт цифровых интеллектуальных систем, Кафедра «Робототехника и Мехатроника», Московский Государственный Технологический Университет «СТАНКИН» (МГТУ «СТАНКИН»), Россия, 127055, Москва, Вадковский пер., д. 1, aavorotnikov90@gmail.com, ORCID: 0000-0001-6371-8894

Лопухов Евгений Олегович, м.н.с., ФГБОУ ВО Российский Университет Медицины Минздрава России, Россия, 127006, Москва, ул. Долгоруковская, д. 4; аспирант, Институт цифровых интеллектуальных систем, Кафедра «Робототехника и Мехатроника», МГТУ «СТАНКИН», Россия, 127055, Москва, Вадковский пер., д. 1, lopukhov.evgeniy.o@gmail.com, ORCID: 0000-0003-4298-1030

Подураев Юрий Викторович, д.т.н., профессор, директор, подразделение НИИ «Технобиомед», ФГБОУ ВО Российский Университет Медицины Минздрава России, Россия, 127006, Москва, ул. Долгоруковская, д. 4; профессор, МГТУ «СТАНКИН», Институт цифровых интеллектуальных систем, Кафедра «Робототехника и Мехатроника», Россия, 127055, Москва, Вадковский пер., д. 1, poduraev@mail.ru, ORCID: 0000-0002-7585-6466

Гринь Андрей Анатольевич, д.м.н., в.н.с., ФГБОУ ВО Российский Университет Медицины Минздрава России, Россия, 127006, Москва, ул. Долгоруковская, д. 4; заведующий научным отделением неотложной нейрохирургии, НИИ скорой помощи им. Н.В. Склифосовского (НИИ СП им. Н.В. Склифосовского ДЗМ), Россия, 129090, Москва, Большая Сухаревская пл., д. 3; главный нейрохирург министерства здравоохранения Российской Федерации, aagreen@yandex.ru, ORCID: 0000-0003-3515-8329

Левченко Олег Валерьевич, д.м.н., профессор РАН, заведующий кафедрой «Нейрохирургии и Нейрореанимации», ФГБОУ ВО Российский Университет Медицины Минздрава России, Россия, 127006, Москва, ул. Долгоруковская, д. 4, levchenko-ov@msmsu.ru, ORCID: 0000-0003-0857-9398

Направления для анализа интраоперационных данных транспедикулярной фиксации с помощью программного комплекса

Ю.Н. Куликов[1,2]✉, А.А. Воротников[1,2], Е.О. Лопухов[1,2], Ю.В. Подураев[1,2], А.А. Гринь[1,3,4], О.В. Левченко[1]

[1]Российский Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский Университет Медицины» Министерства здравоохранения Российской Федерации (ФГБОУ ВО Российский Университет Медицины Минздрава России), Москва, Россия, kulikobyura@mail.ru
[2]Московский Государственный Технологический Университет «СТАНКИН» (МГТУ «СТАНКИН»), Москва, Россия
[3]НИИ скорой помощи им. Н.В. Склифосовского (НИИ СП им. Н.В. Склифосовского ДЗМ), Москва, Россия
[4]Департамент здравоохранения города Москвы, Москва, Россия,

Аннотация
Транспедикулярная фиксация является одним из наиболее распространённых типов операции при лечении заболеваний позвоночника. Данная хирургическая операция требует большой точности позиционирования винтов в теле позвонка, поскольку мальпозиция винта может привести к повреждению спинного мозга или повлечь послеоперационные осложнения. Для проведения данной нейрохирургической операции хирургам необходимо досконально изучить повреждения позвоночника, выявить заболевания пациента и составить план операции. Для этих целей в медицине применяется компьютерная томография (КТ), которая позволяет заглянуть в тело человека без инвазивного вмешательства. Проблемой КТ является то, что все представленные данные являются относительными и хирурги рассматривают их с точки зрения визуализации. Важно понимать, что вся костная ткань пациента может иметь отклонения в значениях, что будет не так заметно при визуализации. По этой причине было принято решение создать систему для сбора данных о пациентах и их компьютерных томографий. Планируется, что данная система будет служить подспорьем при получении более точного описания данных рентгенопрозрачности костных тканей пациента.

Ключевые слова
Информационная система, компьютерная томография, обработка данных, транспедикулярная фиксация позвоночника, медицинская робототехника.

Directions for the analysis of intraoperative transpedicular fixation data using a software package

Yuri N. Kulikov[1,2]✉, Andrey A. Vorotnikov[1,2], Evgenii O. Lopukhov[1,2], Yuri V. Poduraev[1,2], Andrey A. Grin[1,3,4], Oleg V. Levchenko[1]

[1]Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Russian University of Medicine» of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation (Russian University of Medicine), Moscow, Russia, kulikobyura@mail.ru
[2]Moscow State Technological University «STANKIN» (MSTU «STANKIN»), Moscow, Russia
[3]Sklifosovsky Research Institute For Emergency Medicine (Sklifosovsky Institute), Moscow, Russia
[4]Moscow Healthcare Department, Moscow, Russia

Abstract
Transpedicular fixation is one of the most common types of operations when spinal diseases occur. This surgical operation requires high precision in using a rifle in the vertebral body, since a small position of the screw can lead to spinal cord injury or damage to postoperative devices. To perform this neurosurgical operation, surgeons need to thoroughly examine the jaw injury, identify the patient's disease and make an operation plan. For these purposes, computed tomography (CT) is used in medicine, which allows you to look into the human body without an invasive factor. The problem with CT is that all the data presented is relative, and surgeons consider them from the point of view of visualization. It is important to understand that any patient's bone tissue may have deviations in values that will not be so noticeable during visual examination. For this reason, it was decided to create a system for collecting data on patients and their CT scans. It is planned that an effective system will help in obtaining a more accurate description of the radiolucency data of the patient's bone tissue.

Key words
Information system, computed tomography, data processing, transpedicular fixation of the spine, medical robotics.

Введение

На сегодняшний день в медицине всё большую популярность приобретает робот-ассистированная хирургия [1,2]. Это современный и перспективный вид оперативных вмешательств, обладающий рядом преимуществ по сравнению с традиционной методикой проведения операций, особенно при работе в ограниченных

пространствах, таких как область малого таза, сердце и позвоночный столб. Внедрение роботов-ассистентов позволяет повысить точность, безопасность и эффективность проводимых во время операции манипуляций с тканями пациента.

Роботы могут выполнять различные задачи при проведении операции, например, выступают в качестве рук хирурга (робот Da Vinci) [3], в качестве специализированного инструмента (CyberKnife) [4], или в качестве направляющего устройства для хирургического инструмента (ROSA Spine) [5].

При проведении нейрохирургических операций на позвоночнике роботы в основном используются в качестве направляющих устройств. Одно из самых распространённых оперативных вмешательств в нейрохирургии позвоночника — это транспедикулярная фиксация позвоночника, заключающаяся в стабилизации позвонков относительно друг друга посредством транспедикулярных винтов, вводимых в тело позвонка и скрепляемых между ними металлических стержней. Наиболее ответственной частью операции является подготовка отверстия в позвонке и введение транспедикулярного винта, т.к. все хирургические манипуляции производятся в непосредственной близости от спинного мозга пациента. Применение роботов в данном контексте позволяет минимизировать отклонение положения и ориентации хирургического инструмента от запланированной траектории введения во время хирургических манипуляций, следовательно, уменьшить уровень риска для пациента, а также повысить качество и эффективность, за счёт уменьшения времени проведения операции. Наиболее современными и малоинвазивными являются операции на закрытом операционном поле. Операции такого типа проводятся строго с применением современных методов хирургической навигации и по возможности с роботом, поскольку хирург не имеет зрительный доступ к поверхности позвонка, что затрудняет визуальное определение анатомических ориентиров для определения траектории введения транспедикулярного винта. Для применения робота в операциях на закрытом операционном поле, необходимо иметь координаты поверхностей позвонков, полученных в предоперационном режиме. Одним из способов получения такой информации является компьютерная томография (КТ) и рентген.

Компьютерная томография представляет собой набор изображений, описывающих внутреннюю структуру исследуемого объекта. Плотность структур исследуемого объекта определяется его рентгенопрозначностью по шкале Хаунсфила (HU). Значения HU являются относительными, где нулем выступает рентгенопрозрачность воды [6]. Для удобства изучения наборы двумерных изображений преобразуют в воксельную трехмерную модель, или сегментируют ее в твердотельные объекты. Используя данные КТ, хирурги могут изучить травмы и заболевания пациента, составить план операции. Для навигации в основном используются твердотельные сегментированные модели, по которым нейрохирурги проводят планирование операций. Проблема заключается в том, что данные модели объединяют все структуры тканей, которые находятся внутри изучаемого объекта, в единую модель. При этом теряется вся информация о внутренней структуре объекта. Анализ этих данных может быть критически важен при навигации робототехнических систем, поскольку, анализируя внутренние структуры появляется возможность исследовать выбираемую траекторию, которая может позволить провести более успешную операцию. Использование такого подхода при проведении операций по транспедикулярной фиксации может качественно улучшить выбор траектории введения винтов в тело позвонка.

Отсюда возникает необходимость использования необработанных данных, которые могут наиболее точно описать структуру костей. Сбор значительного набора данных, содержащих характеристики костных тканей пациентов с различными физиологическими параметрами и анамнезом позволит проводить статистический анализ этих характеристик для разных групп пациентов, который поможет хирургам принимать решения в отношении лечения. Например, решение о необходимости проведения операции, использования костного цемента или выборе параметров транспедикулярных винтов.

Таким образом появилась идея создания системы, для сбора хранения и обработки таких данных [7, 8], которую в дальнейшем можно было бы модифицировать для использования в контексте навигации медицинских роботов.

Разработанная информационная система для работы с данными

Система представляет собой клиент-серверное микросервисное приложение. Сервер служит для хранения и обработки данных, включает набор сервисов и баз данных, которые могут работать как на одной машине, так и распределённо. Клиентская часть служит для взаимодействия пользователя с сервером, и представляет собой интерфейс с набором заготовленных сценариев. Пользователь обладает возможностью обрабатывать подготовленные данные на сервере, не храня их у себя локально.

Данные хранятся в нескольких базах данных, определенных по специфике данных. Вся информация связана между собой идентификаторами, которые уникальны в системе и ссылаются на определенный объект. Так вся описательная информация хранится в нескольких коллекциях базы данных MongoDB, а для хранения компьютерных томографий используется PACS сервер Orthanc.

Для работы системы создано множество микросервисов, каждый из которых выполняет свой набор задач. Задачи складываются в цепочки, которые служат для работы с данными. Эти цепочки могут выполнять различные наборы действий, например, цепочка сохранения КТ в системе: получить файл от пользователя, сохранить его во временное хранилище, проверить целостность файла, сохранить КТ в базу данных, создать

запись о КТ в коллекции исследований, добавить пациенту метку с идентификатором КТ, удалить из временного хранилища файл, вернуть пользователю информацию о успешном завершении операции. За многие задачи в системе отвечает отдельный модуль, который их и решает. Такой подход к работе с данными позволяет быстро изменять отдельные звенья цепочки, для изменения результата ее выполнения. Это упрощает разработку и делает систему менее связной. Также важно понимать, что несколько отдельных машин могут выполнять одни и те же задачи. Для этого предусмотрена очередь задач, которая автоматически распределяет нагрузку между сервисами. Еще одним преимуществом является то, что, если одна из рабочих машин выйдет из строя, остальные продолжат работать и выполнять задачи обработки данных.

Для обработки данных используется специальный модуль, в котором используется стороннее программное обеспечение Slicer 3D. Для него написаны скрипты обработки компьютерных томографий, которые используются для получения денситометрических данных. На вход данный модуль получает DICOM файлы, и список примитивов, информацию о которых необходимо собрать с данного КТ. Модуль открывает КТ в режиме без интерфейса, после чего производит сбор данных и формирует из них большой CSV файл, который и будет передан пользователю.

Основным элементом для получения данных является точка, используя которую можно построить другие геометрические примитивы. На текущий момент в системе используются точки, линии и поверхностные цилиндры. Используя эти примитивы, пользователь может производить разметку и получать из нее данные о рентгенопрозрачности. Все собираемые данные представлены в формате одномерных массивов, которые преобразуются в графики. Массивы собираются по точке или линии. Точка представляет собой массив из одного элемента, в то время как линия содержит столько значений, сколько укажет пользователь. Цилиндры сами по себе состоят из набора линий, потому и значения с них собираются по тому же принципу.

Клиентское приложение получает файл с набором данных, и используя его строит графическое представление. Пользователю доступен набор заготовленных сценариев построения данных, используя которые он может изучать выделенные структуры. Система построена таким образом, что создание новых примитивов является относительно простой задачей.

Описание способов взаимодействия с разработанной информационной системой

Попадая в систему, пользователь видит простой интерфейс с набором кнопок, нажимая на которые он переходит на ту или иную страницу приложения. Каждая страница отвечает за выполнение определенных задач, например, за создание записи о пациенте, вывод списка всех пациентов.

Весь цикл работы пользователя с системой завязан на том, какой цели он хочет достичь. Если пользователь планирует просто расширить набор пациентов, то ему достаточно внести анамнез пациента, описать проведенные исследования и операции. Если пользователь планирует использовать КТ пациента для дальнейшего изучения, лучше всего провести сведение нужных позвонков и сразу разметить на них геометрические примитивы, которые будут необходимы в будущем. Это избавит пользователя от необходимости скачивать исследования пациента повторно. После сбора нужного набора данных пользователь составляет выборку для анализа и получает результат по множеству пациентов. Если хирургу необходимо проанализировать проведенную операцию, он может разметить примитивы и создать выборку из одного пациента.

Информация, вносимая пользователями, в дальнейшем будет использоваться для построения статистических моделей. Чем больше разнородной информации будет находится в системе, тем больше различных зависимостей получится выявить при проработке данных.

Для работы с КТ пациентов в системе предусмотрены инструмент для открытия, просмотра и разметки двумерных изображений приведенный на рисунке 1, и инструмент для сведения этих изображений в трехмерном пространстве приведенный на рисунке 2. Сведение подразумевает создание матрицы перехода, которая используется для переноса разметки одного КТ на другое. Таким образом получается создавать одинаковые разметки на разных исследованиях и сравнивать их между собой. Каждая подобная разметка представляет собой координаты точек на томографии, которые в любой момент можно воспроизвести и получить изначальную разметку. Получение самих данных скрыто от пользователя, он только строит и сохраняет разметки, создает выборки и получает результаты для дальнейшего изучения.

Предлагаемый подход, заключается в постоянном расширении данных в системе и использовании этих данных для различных нужд. Например, используя перенос линий с исследования после операции на исследование до операции, хирурги могут более точно оценить качество положения винта по шкале Герцбейна-Роббинса [9, 10]. Для этого врачу будет необходимо свести позвонок и расположить линию по центру винта. Таким образом, производя эту манипуляцию с каждым пациентом, получится набор частично размеченных данных, которые могут быть использованы и для других нужд. Поскольку операция сведения и разметки являются отдельными действиями и сохраняются отдельно, сведения можно будет переиспользовать для других нужд. Такой же принцип можно применять и для других действий. Все подготовленные сейчас являются вкладом в будущее системы.

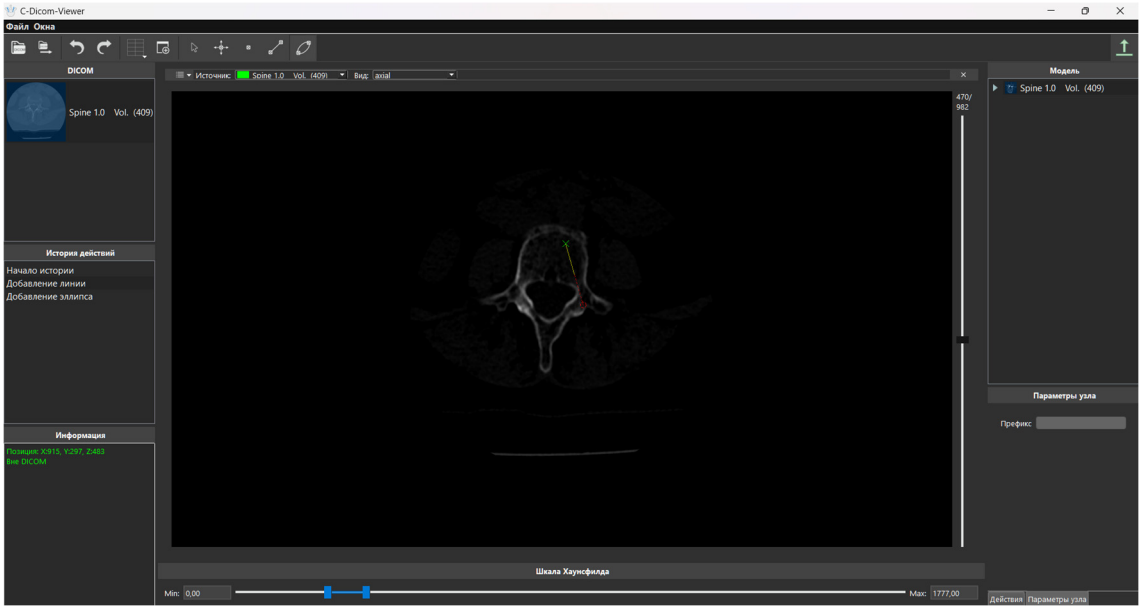


Рисунок 1 — Подпрограмма разметки примитивов на КТ

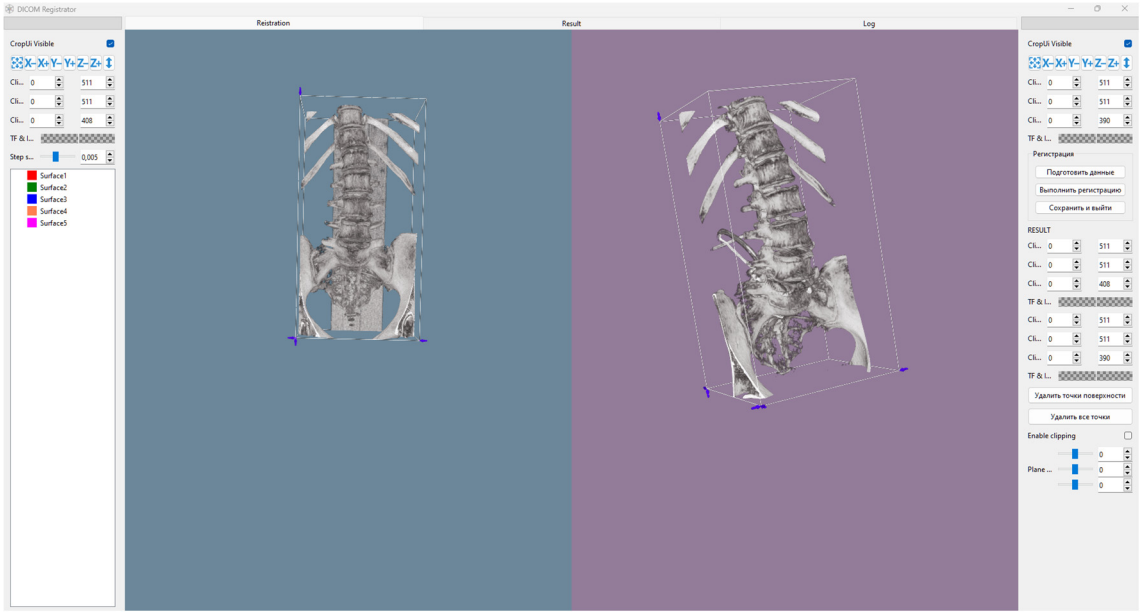


Рисунок 2 — Подпрограмма сведения КТ

Исходя из вышесказанного, можно сказать, что система построена для работы с медицинскими большими данными, в которых применяются трехмерные изображения пациентов. Все собранные данные в дальнейшем могут использоваться для улучшения подходов к планированию и навигации в робото-ассистированной хирургии, обучения алгоритмов машинного обучения и искусственного интеллекта.

Направления анализа денситометрических данных используемых при проведении операций по транспедикулярной фиксации позвоночника

Наиболее приоритетными направлениями для анализа является поиск закономерностей в денситометрических и анамнестических данных. Именно для поиска таких закономерностей необходимо хранить наиболее полный анамнез пациента. Данные могут быть сгруппированы и проанализированы не только по отдельным пациентам, но и по другим параметрам, таким как конкретные позвонки, типы заболеваний, возрастные группы и другие клинические характеристики. С расширением базы данных, пользователям еще предстоит выявить уникальные зависимости, которые приведут к обоснованным результатам.

На рисунке 3 показаны основные направления анализа денситометрических данных используемых при проведении операций по транспедикулярной фиксации позвоночника.

Рисунок 3 — Основные направления анализа денситометрических данных используемых при проведении операций по транспедикулярной фиксации позвоночника

В первую очередь, во время тестирования выявлены направления анализа, к которым относятся определение влияния металлоконструкций на значения рентгенопрозрачности, поиск зависимости плотности костной ткани от заболеваний или номера позвонка, зависимость рентгенопрозрачности от возраста пациента, оценка положения винта по значениям HU.

Например, на рисунке 4 приведен график, на котором показаны уменьшения значений HU, вызванные наличием винтов. Линии размечены на послеоперационном КТ и перенесены на КТ до операции, как показано на рисунке 5. Таким образом появляется возможность сравнить данные из разных КТ в одном и том же месте. По графику видно насколько спадают значения в областях затемнения, создаваемых винтами. Данные артефакты присутствуют на всех КТ с металлоконструкциями, и не позволяют полноценно изучить форму позвонка.

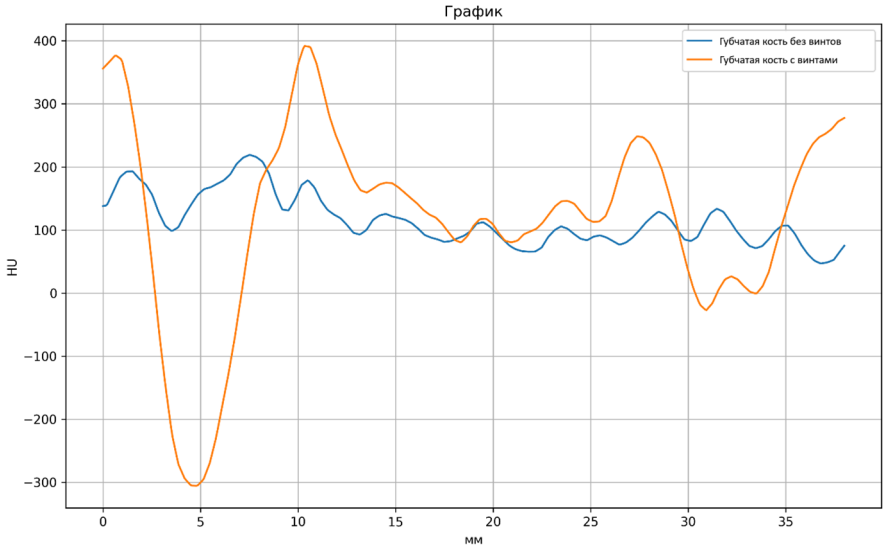


Рисунок 4 — График значений HU губчатой ткани с винтом и без винта

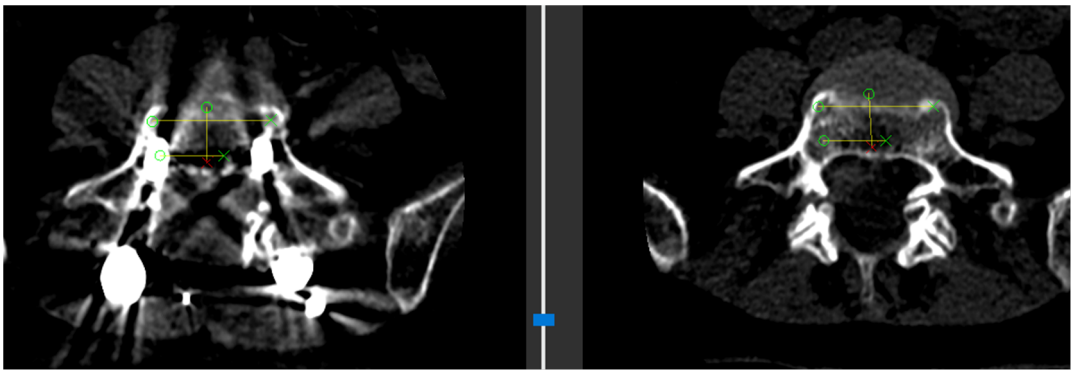


Рисунок 5 — Разметка линий на предоперационном и постоперационном КТ

Вторым направлением является группировка данных по какому-либо признаку. Так, например, на левом графике рисунка 6 приведен график значений HU позвонков, сгруппированных по позвонкам. Такая группировка может производиться и по другим признакам, при этом появляется возможность исследовать группы пациентов с наборами этих признаков. Также можно проводить группировку по возрасту пациентов, и выделять закономерности в значениях HU. График зависимости среднего HU по линии от возраста приведен на рисунке 6 справа. При этом программа делит всех пациентов на группы, в зависимости от пола и ставит им определенный цвет. На меньшем графике, расположенном над основным, приведена гистограмма количества точек, попавших в одну область HU.

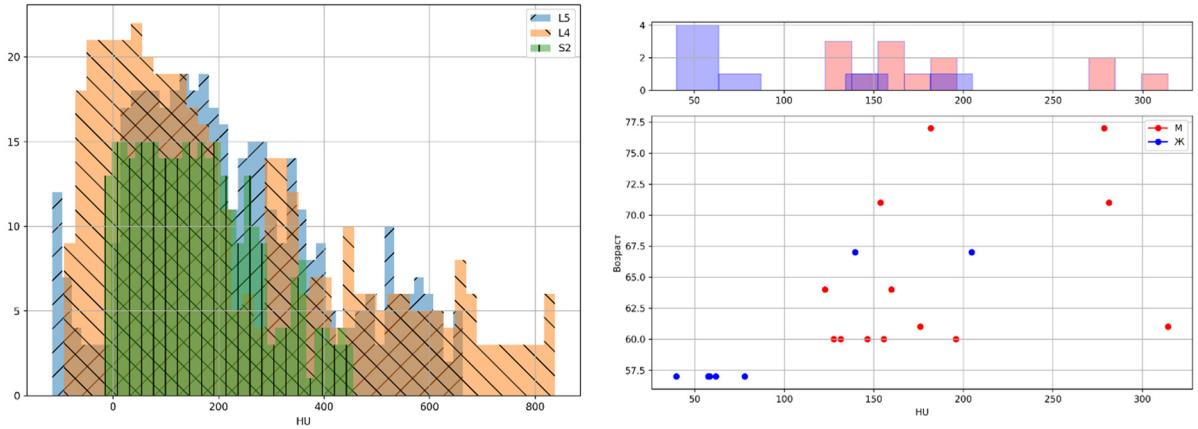


Рисунок 6 — Группировка значений по позвонку и возрасту

Во время операции роботы способны адаптироваться к индивидуальным особенностям пациента, используя интраоперационные данные и обратную связь для корректировки своих действий в режиме реального времени [11]. Например, в роботизированной хирургии позвоночника системы могут компенсировать вариации в плотности кости и анатомических структурах, повышая точность установки транспедикулярных винтов и снижая риск осложнений [12]. Такой персонализированный подход не только улучшает хирургические результаты, но и представляет значительный шаг вперёд в области индивидуализированной медицины [13]. Также существует возможность оценки положения винта в пространстве позвонка. Поскольку можно перенести линии с одного исследования на другое, то появляется возможность проверить структуры, на которые попал винт при установке в позвонок. Для оценки часто используется классификация Герцбейна-Роббинса.

Большие объёмы собранных данных служат фундаментом для обучения алгоритмов машинного обучения и искусственного интеллекта. Используя детальные денситометрические и анамнестические данные пациентов, можно создавать модели, способные анализировать и предсказывать различные клинические исходы. Например, алгоритмы могут определить оптимальные параметры установки транспедикулярных винтов, предсказать вероятность осложнений или необходимость использования дополнительных материалов, таких как костный цемент. Машинное обучение позволяет выявлять скрытые закономерности и зависимости в больших наборах медицинских данных, что невозможно сделать вручную. Интеграция таких моделей в клиническую практику способствует принятию более обоснованных решений, индивидуализации лечения и повышению общей эффективности хирургических вмешательств. Кроме того, обученные алгоритмы могут постоянно совершенствоваться по мере накопления новых данных, что обеспечивает актуальность и адаптивность системы в долгосрочной перспективе [14-17].

Не менее важным является улучшение методик создания фантомов, имитирующих характеристики органов человеческого тела, и обучение медицинского персонала. Получение более точных копий человеческих позвонков позволит использовать их в обучении хирургов, апробации медицинских робототехнических систем, инновационных устройств, инструментов и имплантов, оценки новейших методик проведения оперативных вмешательств. Чем больше фантом на КТ будет соответствовать костным структурам пациентов, тем правдоподобнее будут результаты экспериментов, испытаний и тем выше будет качество обучения нейрохирургов ещё на стадии ординатуры [18-20]. Кроме того, реалистичные модели костных структур, созданные на основе денситометрических данных, активно используются для тренировки хирургов в виртуальной среде, что существенно улучшает навыки работы с роботизированными системами. Эти модели позволяют воспроизводить индивидуальные анатомические особенности пациентов, обеспечивая более точную симуляцию хирургических процедур. Виртуальные тренажёры на основе таких моделей предоставляют возможность отработки сложных манипуляций в безопасной и контролируемой обстановке, что способствует повышению квалификации специалистов. Интеграция больших данных в процесс моделирования позволяет учитывать вариации плотности костной ткани и другие физиологические параметры, делая обучение максимально приближенным к реальным условиям операционной. Это не только улучшает технические навыки хирургов, но и

повышает их уверенность в работе с высокотехнологичным оборудованием, что в конечном итоге приводит к повышению качества медицинской помощи и снижению риска осложнений [21-23].

Заключение

На текущий момент программа тестируется пользователями и накапливает данные, необходимые для дальнейшей работы. В дальнейшей работе планируется расширить набор геометрически примитивов, благодаря которым появятся новые направления по изучению данных. Также планируется использовать приведенный в статье подход в навигации медицинских роботов.

Литература

1. Медицинская робототехника / Подураев Ю.В., Панченков Д.Н., Лискевич Р.В., Базикян Э.А., Чунихин А.А., Малышев И.Ю., Пушкарь Д.Ю., Колонтарев К.Б., Крылов В.В., Гринь А.А., Кордонский А.Ю., Левченко О.В., Семенякин И.В., Письменная Е.В., Воротников А.А., Климов Д.Д. // Общество с ограниченной ответственностью Издательская группа «ГЭОТАР-Медиа». ISBN: 978-5-9704-7503-4, Москва, 2023, DOI: 10.33029/9704-7503-4-ROB-2023-1-384.
2. Куликов Ю.Н. Прототип программного комплекса по анализу интраоперационных данных транспедикулярной фиксации для учета индивидуальных особенностей пациента / Куликов Ю.Н., Мищенков Д.С., Воротников А.А., Климов Д.Д., Подураев Ю.В., Кордонский А.Ю., Гринь А.А., Левченко О.В. – Текст: электронный // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2024661832, 22.05.2024. Заявка от 08.05.2024.
3. Technical review of the da Vinci surgical telemanipulator / C. Freschi, V. Ferrari, F. Melfi [et al] // The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery. – 2013. – Т. 9. – №. 4. – С. 396-406, DOI: 10.1002/rcs.1468.
4. A technical overview of the CyberKnife system / Kilby W. Naylor M., Dooley J. [et al] // Handbook of robotic and image-guided surgery. – 2020. – С. 15-38, DOI: 10.1016/B978-0-12-814245-5.00002-5.
5. Lefranc M. Accuracy of thoracolumbar transpedicular and vertebral body percutaneous screw placement: coupling the Rosa Spine robot with intraoperative flat-panel CT guidance—a cadaver study / Lefranc M., Peltier J. // Journal of robotic surgery. – 2015. – Т. 9. – С. 331-338, DOI: 10.1007/s11701-015-0536-x.
6. Schreiber J. Hounsfield units for assessing bone mineral density and strength: a tool for osteoporosis management / Schreiber J., Anderson P., Rosas H., Buchholz A., Au A. // JBJS. – 2011. – Т. 93. – №. 11. – С. 1057-1063, DOI: 10.2106/JBJS.J.00160.
7. An information management system for collecting, storing, and processing densitometric data to identify promising navigation data for medical robots / Kulikov Yu.N., Vorotnikov A.A., Mishchenkov D.S. [et al.] // Biomedical Engineering. – 2024. – Т. 58. – № 1. – С. 14-18, DOI: 10.1007/s10527-024-10357-4.
8. Информационная система сбора, хранения и обработки денситометрических данных для определения перспективных навигационных данных медицинских роботов / Куликов Ю.Н., Воротников А.А., Мищенков Д.С. [и др.] // Медицинская техника. – 2024. – № 1 (343). – С. 10-13.
9. Gertzbein S. Accuracy of pedicular screw placement in vivo / Gertzbein S. D., Robbins S. E. // Spine. – 1990. – Т. 15. – №. 1. – С. 11-14.
10. Review of currently used classifications for pedicle screw position grading in cervical, thoracic and lumbar spine / Adamski, S., Stogowski, P., Rocławski, M. [et al.] // Chirurgia Narządów Ruchu i Ortopedia Polska. – 2023. – т. 88. – №. 4. – с. 165-171, DOI: 10.31139/chnriop.2023.88.4.2.
11. Novel intraoperative navigation using ultra-high-resolution CT in robot-assisted partial nephrectomy / Takahara, K., Ohno, Y., Fukaya, K., [et al.] // Cancers. – 2022. – Т. 14. – №. 8. – С. 2047, DOI: 10.3390/cancers14082047.
12. Development of a robotic FD-CT-guided navigation system for needle placement—preliminary accuracy tests / Tovar-Arriaga, S., Tita, R., Pedraza-Ortega, J. C., [et al.] // The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery. – 2011. – Т. 7. – №. 2. – С. 225-236. DOI: 10.1002/rcs.393.
13. An integrated system for planning, navigation and robotic assistance for skull base surgery / Xia, T., Baird, C., Jallo, G., Hayes, K., [et al.] // The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery. – 2008. – Т. 4. – №. 4. – С. 321-330, DOI: 10.1002/rcs.213.
14. Examining the ability of artificial neural networks machine learning models to accurately predict complications following posterior lumbar spine fusion / Kim, J. S., Merrill, R. K., Arvind, V. [et al.] // Spine. – 2018. – Т. 43. – №. 12. – С. 853-860, DOI: 10.1097/BRS.0000000000002442.
15. Can a machine learning model accurately predict patient resource utilization following lumbar spinal fusion? / Karnuta, J. M., Golubovsky, J. L., Haeberle, H. S. [et al.] // The Spine Journal. – 2020. – Т. 20. – №. 3. – С. 329-336, DOI: 10.1016/j.spinee.2019.10.007.
16. Machine learning prediction of length of stay in adult spinal deformity patients undergoing posterior spine fusion surgery / Zhang, A. S., Veeramani, A., Quinn, M. S. [et al.] // Journal of Clinical Medicine. – 2021. – Т. 10. – №. 18. – С. 4074, DOI: 10.3390/jcm10184074.

17. van Oosterom M. N. Navigation of a robot-integrated fluorescence laparoscope in preoperative SPECT/CT and intraoperative freehand SPECT imaging data: a phantom study / van Oosterom, M. N., Engelen, M. A., van den Berg, N. S. [et al.] // Journal of biomedical optics. – 2016. – Т. 21. – №. 8. – С. 086008-086008, DOI: 10.1117/1.JBO.21.8.086008.

18. Characterization of synthetic foam structures used to manufacture artificial vertebral trabecular bone / Fürst, D., Senck, S., Hollensteiner, M., [et al.] // Materials Science and Engineering: C. – 2017. – Т. 76. – С. 1103-1111, DOI: 10.1016/j.msec.2017.03.158.

19. Characterization and three-dimensional reconstruction of synthetic bone model foams / Gómez, S., Vlad, M. D., López, J., [et al.] // Materials Science and Engineering: C. – 2013. – Т. 33. – №. 6. – С. 3329-3335, DOI: 10.1016/j.msec.2013.04.013.

20. Szivek J. Characterization of a synthetic foam as a model for human cancellous bone / Szivek, J. A., Thomas, M., Benjamin, J. B. // Journal of Applied Biomaterials. – 1993. – Т. 4. – №. 3. – С. 269-272, DOI: 10.1002/jab.770040309.

21. Percutaneous spinal fixation simulation with virtual reality and haptics / Luciano C., Banerjee P., Sorenson J. [et al.] // Neurosurgery. – 2013. – Т. 72. – С. A89-A96, DOI: 10.1227/NEU.0b013e3182750a8d.

22. Effectiveness of the thoracic pedicle screw placement using the virtual surgical training system: a cadaver study / Hou Y., Lin Y., Shi J. [et al.] // Operative Neurosurgery. – 2018. – Т. 15. – №. 6. – С. 677-685, DOI: 10.1093/ons/opy030.

23. A real time haptic simulator of spine surgeries / Xing Q., Chen J., Li J., [et al.] // Proceedings of the 21st ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology. – 2015. – С. 121-124, DOI: 10.1145/2821592.2821613.

Информация об авторах

Куликов Юрий Николаевич, лаборант-исследователь, подразделение НИИ «Технобиомед», Российский Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский Университет Медицины» Министерства здравоохранения Российской Федерации (ФГБОУ ВО Российский Университет Медицины Минздрава России), Россия, 127006, Москва, ул. Долгоруковская, д. 4; магистрант, Институт цифровых интеллектуальных систем, Кафедра «Робототехника и Мехатроника», Московский Государственный Технологический Университет «СТАНКИН» (МГТУ «СТАНКИН»), Россия, 127055, Москва, Вадковский пер., 1, kulikobyura@mail.ru, ORCID: 0009-0006-6199-1057

Воротников Андрей Александрович, н.с., подразделение НИИ «Технобиомед», ФГБОУ ВО Российский Университет Медицины Минздрава России, Россия, 127006, Москва, ул. Долгоруковская, д. 4; старший преподаватель, Институт цифровых интеллектуальных систем, Кафедра «Робототехника и Мехатроника», МГТУ «СТАНКИН», Россия, 127055, Москва, Вадковский пер., 1, aavorotnikov90@gmail.com, ORCID: 0000-0001-6371-8894

Лопухов Евгений Олегович, м.н.с., ФГБОУ ВО Российский Университет Медицины Минздрава России, Россия, 127006, Москва, ул. Долгоруковская, д. 4; аспирант, Институт цифровых интеллектуальных систем, Кафедра «Робототехника и Мехатроника», МГТУ «СТАНКИН», Россия, 127055, Москва, Вадковский пер., 1, lopukhov.evgeniy.o@gmail.com, ORCID: 0000-0003-4298-1030

Подураев Юрий Викторович, д.т.н., профессор, директор, подразделение НИИ «Технобиомед», ФГБОУ ВО Российский Университет Медицины Минздрава России, Россия, 127006, Москва, ул. Долгоруковская, д. 4; профессор, МГТУ «СТАНКИН», Институт цифровых интеллектуальных систем, Кафедра «Робототехника и Мехатроника», Россия, 127055, Москва, Вадковский пер., 1, poduraev@mail.ru, ORCID: 0000-0002-7585-6466

Гринь Андрей Анатольевич, д.м.н., в.н.с., ФГБОУ ВО Российский Университет Медицины Минздрава России, Россия, 127006, Москва, ул. Долгоруковская, д. 4; заведующий научным отделением неотложной нейрохирургии, НИИ скорой помощи им. Н.В. Склифосовского (НИИ СП им. Н.В. Склифосовского ДЗМ), Россия, 129090, Москва, Большая Сухаревская пл., д. 3; главный нейрохирург министерства здравоохранения Российской Федерации, aagreen@yandex.ru, ORCID: 0000-0003-3515-8329

Левченко Олег Валерьевич, д.м.н., профессор РАН, заведующий кафедрой «Нейрохирургии и Нейрореанимации», ФГБОУ ВО Российский Университет Медицины Минздрава России, Россия, 127006, Москва, ул. Долгоруковская, д. 4, levchenko-ov@msmsu.ru, ORCID: 0000-0003-0857-9398

Исследования особенностей выполнения космонавтами совместной операторской деятельности по применению антропоморфного робота совмещенного с мобильной платформой в режиме телеуправления в длительных космических экспедициях

В.А. Дикарев, А.Н. Симбаев✉, А.Ю. Кикина, Ю.С. Чеботарев, И.А. Буковская, Э.В. Никитов
Федеральное Государственное Бюджетное Учреждение «Научно-исследовательский испытательный центр подготовки космонавтов имени Ю.А. Гагарина (ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина»), п. Звездный городок, Московская обл., Россия

Studies of the peculiarities of cosmonauts performing joint operator activities on the use of an anthropomorphic robot combined with a mobile platform in remote control mode in long-term space expeditions

Vladimir A. Dikarev, Alexander N. Simbaev✉, Anna Yu. Kikina, Yuri S. Chebotarev, Inna A. Bukovskaya, Eduard V. Nikitov
STATE Organization «Gagarin Research&Test Cosmonaut Training Center», Star City, Moscow region, Russia, A.Simbaev@gctc.ru

Компоненты эргатической системы (ЭС) «космонавт – робототехническая система (РТС)» могут находиться в бинарных системных отношениях взаимодействия: конфликт, безразличие и сотрудничество. Конфликт характеризуется снижением целевой функции полезности ЭС «космонавт – РТС», безразличие – её неизменностью, сотрудничество – её повышением. Безусловно, целью создания и применения таких РТС является достижение между компонентами системы ЭС сотрудничества путем недопущения конфликта и исключения безразличия.

Концептуально взаимодействие космонавта и РТС, а также рабочий процесс в коллаборативной робототехнической системе (КРТС) можно разбить на следующие классы: сосуществование; кооперация; коллаборация.

Класс непосредственно самого взаимодействия определяется четырьмя атрибутами: рабочее время; рабочее пространство; общая цель; физический контакт.

Соотношение классов и атрибутов класса взаимодействия показан на рис. 1 [1, 2, 3, 4].

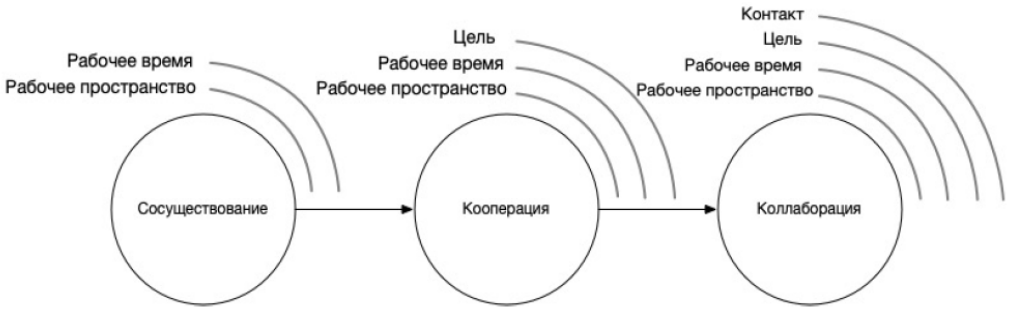


Рисунок 1 — Классификация взаимодействия космонавта и РТС по классам взаимодействия

В представленной классификации взаимодействия космонавта и РТС отображается длительность совершения совместных действий в рамках единого рабочего пространства. Если космонавт и РТС находятся в едином рабочем пространстве, то данное взаимодействие представляет собой их сосуществование. При наличии единой цели взаимодействия космонавт и РТС кооперируются для выполнения поставленных задач, а если происходит контакт с объектом воздействия или, например, используется речевое управление роботом, то такое взаимодействие может быть обозначено как коллаборация космонавта и РТС.

Под коллаборативными роботами (коботами) принято понимать автоматические устройства, которые могут работать совместно с человеком для создания или производства различных продуктов; под робототехникой (от робот и техника; англ. robotics) – прикладную науку, занимающуюся разработкой автоматизированных технических систем.

Развитие и внедрение коллаборативных роботизированных технологий и средств (КРТиС), направленных на выполнение совместных операций с эффектом в отношениях сотрудничества в сочетании с интеллектуальными интегрированными технологиями и средствами виртуальной, дополненной реальности и манипуляции (элементов искусственного интеллекта) является предпосылкой:

– для трансформации роботов-помощников космонавтов в роботы-партнеры космонавтов, которые обеспечат их взаимодействие с эффектом отношения сотрудничества в процессе выполнения совместной деятельности, соответственно, и расширение задач на Российской орбитальной станции (РОС) с использованием КРТС;

– для разработки РТС, обеспечивающих выполнение задач во время отсутствия космонавтов.

Таким образом, на основании вышеизложенного, предлагается метод проектирования содержательного компонента заданий на применение РТС, отличающегося от известных тем, что в нем используются показатели взаимной ориентации и взаимного влияния операций, по которым при возникновении конфликта применения заданий на использование РТС осуществляется выбраковка конфликтных и выбор рациональных операций, сгенерированных из допустимого множества функциональных действий операторов.

Это вполне соответствует пониманию конфликто-защищенности в широком смысле слова, которое выражается как способность к выявлению полезных содержательных компонентов заданий на применение РТС в условиях конфликтов, вызванных изменяющимися условиями функционирования РТС. Характерным достоинством этого метода, аналогично, как и системной модели проектирования операций, является его инвариантность как целевому и функциональному назначению, так и физико-математическому и структурно-параметрическому представлению РТС [5].

Одной из ключевых особенностей коллаборативного взаимодействия космонавта с РТС является выполнение ими совместных операций, которые по своей сути являются спаренными или бигеминальными. Одними из способов обоснования необходимости и достаточности достижимости бигеминальности операторской деятельности космонавтов в ППКП могут стать специальные экспериментальные исследования на моделирующих комплексах до и после воздействия невесомости и других неблагоприятных факторов длительных ППКП. С учетом этого адаптирован метод предварительного проектирования средств и интерфейсов информационной поддержки деятельности экипажей ПКА в интересах предварительного проектирования средств и интерфейсов операционной поддержки деятельности космонавтов с применением РТС [6, 7, 8].

Этот метод позволяет разрешить перекрестные взаимосвязи относительно обеспечения операторской деятельности космонавтов с применением РТС, а именно между:

– операторской деятельностью космонавтов в длительных пилотируемых космических полетах и обликом средств и интерфейсов операционной поддержки деятельности экипажей ПКА с применением РТС с учетом тенденций развития конструкторско-технологических решений;

– обликом средств и интерфейсов операционной поддержки деятельности экипажей ПКА с применением РТС и конфигурацией моделирующих и натурных (физических) стендов, в частности, универсальный компьютерный стенд (УКС) РТС, используемых для оценки операторской деятельности космонавтов длительных пилотируемых космических полетов.

Базовым стендом для проведения данных экспериментальных исследований в ближайшей перспективе планируется к использованию УКС РТС Центра подготовки космонавтов.

С помощью УКС РТС выполняется моделирование выполнения полетных технологических операций РТС в виртуальной среде при копирующем управлении космонавтом-оператором с помощью задающего устройства копирующего типа, а также возможность управления реальной РТС (например, анропоморфный робот, совмещенный с мобильной платформой). Применительно к лунным экспедициям, в первую очередь требуется рассмотреть модели и механизмы коллаборативного взаимодействия космонавта – оператора и РТС, отражающие этапы отработки технологий РТС в соответствии с необходимостью и достаточностью достижения степени бигеминальности операторской деятельности в длительных ПКП.

Они станут основой для адаптации методов структурно-параметрического поиска решений на стадии предварительного проектирования компонентов коллаборативного взаимодействия космонавтов и РТС с возможностями их экспериментальной отработки на моделирующих и натурных комплексах ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина», включая УКС РТС.

Серия планируемых исследований по возможным направлениям обеспечения коллаборативного взаимодействия космонавтов с РТС для ППКП, в первую очередь, направлена на определение применимости рассмотренного научно-методического аппарата с экспериментальным подтверждением возможностей и ограничений его использования. В случае успешной апробации и верификации рассмотренного научно-методического аппарата появятся дополнительные возможности для оценки операторской деятельности космонавтов с точки зрения обеспечения коллаборативного взаимодействия космонавтов с различными объектами космической техники, планируемых к использованию при реализации ППКП. Для этого, конечно, необходимо получить соответствующие экспериментальные данные.

При этом, одним из направлений экспериментальных исследований является согласование свойств интерактивности и ассистивности окружения РТС с возможностями восприятия информации космонавтом, что может быть достигнуто развитием диалоговых средств, включая применение многомодальных интерфейсов взаимодействия системе «космонавт – робот-помощник». Наиболее значимая тенденция в проектировании интерфейсов взаимодействия космонавтов с РТС при выполнении совместных операций: использование многомодальных пользовательских интерфейсов [7].

Вывод

Решение этих задач способствуют получению:

1. Данных о динамике изменения качественных показателей профессиональной деятельности космонавтов с использованием КРТиС в обеспечение функционирования ПКК, обслуживание их систем в беспилотном полете и при нештатных ситуациях, а также ограничениях функциональных возможностей членов экипажа при совместном выполнении операций ВнуКД и ВКД, а также в моделируемых на Земле условиях космического полета.
2. Данных о динамике изменения качественных показателей операционной и информационной поддержки деятельности космонавтов с использованием КРТиС в обеспечение функционирования ПКК, обслуживание их систем в беспилотном полете и при нештатных ситуациях, а также ограничениях функциональных возможностей членов экипажа при совместном выполнении операций ВнуКД и ВКД, а также в моделируемых на Земле условиях космического полета.
3. Данных о динамике изменения качества операторской деятельности космонавта с использованием КРТиС в обеспечение функционирования ПКК, обслуживание их систем в беспилотном полете и при нештатных ситуациях, а также ограничениях функциональных возможностей членов экипажа при совместном выполнении операций ВнуКД и ВКД, а также в моделируемых на Земле условиях космического полета.
4. Данных о согласования сценариев использования КРТиС в обеспечение функционирования ПКК, обслуживание их систем в беспилотном полете и при нештатных ситуациях, а также ограничениях функциональных возможностей членов экипажа при совместном выполнении операций ВнуКД и ВКД, а также в моделируемых на Земле условиях космического полета.

Наличие этих данных позволит обеспечить проектирование и отработку коллаборации и интерфейса взаимодействия космонавтов с РТС для операционной и информационной поддержки деятельности экипажей в ППКП.

Литература

1. Дикарев В.А., Чеботарев Ю.С. Разработка элементов коллаборативного взаимодействия космонавтов с робототехническими системами для пилотируемых космических полетов. //Идеи и Новации. – 2022. – № 1-2. – Том: 10. – С. 99-103.
2. О возможности отработки коллаборативного использования антропоморфной и манипуляционной робототехнической системы для операционной поддержки внекорабельной деятельности космонавтов. /В.А. Дикарев, А.Ю. Кикина, Ю.С. Чеботарев, Э.В. Никитов, М.В. Кондратенко, Ю.С. Агаркова. //Пилотируемые полеты в космос. – 2022. – №3 (44). – С. 69-84.
3. Ющенко А.С. Эргономические проблемы коллаборативной робототехники.//Робототехника и техническая кибернетика. Т. 7. №2. 2019. – С.85-93.
4. Чеботарев Ю.С., Дикарев В.А. О некоторых направлениях обеспечения коллаборативного взаимодействия космонавтов с робототехническими системами для пилотируемых космических полетов. // Труды международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника» (ProceedingsoftheInternationalscientificandtechnologicalconference «Extremerobotics»). – 352 с. – 10.31776/ConfER.32.2021. – С. 65-77.
5. О возможности отработки коллаборативного использования антропоморфной и манипуляционной робототехнической системы для операционной поддержки внекарабельной деятельности космонавтов / В.А.Дикарев, А.Ю. Кикина, Ю.С. Чеботарев, Э.В. Никитов, М.В. Кондратенко, Ю.С. Агаркова // Пилотируемые полеты в космос. – № 3(44). – 2022. – С.69-84.
6. Исследование возможностей использования робототехнических систем для поддержания операторской деятельности экипажей и формирования экосистемы/микроклимата сотрудничества / В.А. Дикарев, В.И. Дубинин, А.Н. Симбаев, А.Ю. Кикина, Ю.С. Чеботарев, Э.В. Никитов, И.А. Розанов // Пилотируемые полеты в космос. – № 2(47). – 2023. – С. 15-31.
7. Галин Р.Р., Мамченко М.В., Галина С.Б., Мещеряков Р.В. Исследование и разработка подходов к распределению задач в коллаборативной робототехнической системе / Материалы 18-й Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления» и 14-ой 1. О создании комплексного стенда-тренажера робототехнических систем для решения научно-прикладных задач на Российской орбитальной станции / В.А. Дикарев, А.Н. Симбаев, А.Ю. Кикина, Д.А. Петелин, Ю.С. Чеботарев, Э.В. Никитов, А.В. Фалеев, И.А. Пеньков. //Пилотируемые полеты в космос. – №2 (51)/2024. – С. 47-61.молодежной школы-семинара «Управление и обработка информации в технических системах» (Таганрог, 2023). Таганрог: ООО Издательство «Лукоморье», 2023. С. 72-76.
8. О создании комплексного стенда-тренажера робототехнических систем для решения научно-прикладных задач на Российской орбитальной станции / В.А. Дикарев, А.Н. Симбаев, А.Ю. Кикина, Д.А. Петелин, Ю.С. Чеботарев, Э.В. Никитов, А.В. Фалеев, И.А. Пеньков. //Пилотируемые полеты в космос. – №2 (51)/2024. – С. 47-61.

Интерфейс дополненной реальности для совместных операций космонавтов и автономных мобильных роботов на лунной поверхности

И.Н. Куликов[1]✉, Б.И. Крючков[1], В.М. Усов[1,2]
[1]*Федеральное государственное бюджетное учреждение «Научно-исследовательский испытательный центр подготовки космонавтов имени Ю.А. Гагарина» (НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина), п. Звездный городок, Московская область, Россия, ikul@mail.ru*
[2]*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Государственный научный центр Российской Федерации Институт медико-биологических проблем Российской академии наук (ГНЦ РФ – ИМБП РАН), Москва, Россия*

Аннотация
Перспективные планы освоения Луны человеком предполагают роботизированное обеспечение внекорабельной деятельности (ВКД) экипажа космонавтов на лунной поверхности. Одним из главных условий безопасности ручных операций космонавта в скафандре и его мобильности при передвижении по лунной поверхности является поддержание связи с другими участниками ВКД, работающими удаленно на лунных базах, с совместным доступом к источникам актуальной обновляемой информации. В состав такой информации целесообразно включать данные предварительного и обновленного картографирования и маршрутизации местности по оперативно собираемым лунными роботами данным о локализации объектов в районе работ с помощью бортовых средств обследования территории непосредственно в зоне выполнения операций. При ограниченной поддержке ВКД экипажа лунной миссии от наземного Центра управления полетом улучшению взаимодействия в смешанной команде экипажа с роботами может способствовать: коммуникации между дистанционно удаленными членами экипажа (в том числе как на лунных базах, так и вне герметичных помещений на поверхности Луны) по вопросам сбора и представления навигационной информации; формирование и отображение визуальных данных для обеспечения совместного доступа членов экипажа к результатам распознавания объектов внешней среды, навигационно-справочной информации, данным о локализации объектов в зоне деятельности космонавта на выходе, предупреждающей информации о возможных рисках незапланированного развития событий в масштабе времени, близком к реальному; анализ навигационной информации и информации о рисках столкновений при перемещении мобильных лунных роботов в зоне ручных операций для своевременного аварийного оповещения членов экипажа. Одна из актуальных проблем заключается в рациональном представлении совокупности разнородных навигационных данных на средствах отображения информации в скафандре с использованием проекционных дисплеев на основе дополненной реальности. Рассматриваются вопросы повышения ситуационной осведомленности космонавта в скафандре при выполнении ВКД на лунной поверхности за счет активного применения интерфейса дополненной реальности (AR-интерфейса) для управления доступом к каналам и источникам данных о навигации и локализации на единой семантической основе.

Ключевые слова
Лунные миссии, внекорабельная деятельность на лунной поверхности (ВКД), роботизированная поддержка экипажа, совместно выполняемые операции, навигация и локализация, взаимодействие человек-робот, виртуальная и дополненная реальность (VR/AR), космический скафандр, носимый головной шлем (HUD), AR- интерфейс.

Augmented reality interface for joint operations on the lunar surface by a mixed team of cosmonauts and autonomous mobile robots

Igor N. Kulikov[1]✉, Boris I. Kryuchkov[1], Vitaliy M. Usov[1,2]
[1]*Federal State Organization «Yu.A. Gagarin Research &Test Cosmonaut Training Center», (Gagarin Research&Test Cosmonaut Training Center), Star City, Moscow Region, Russia, ikul@mail.ru*
[2]*Russian Federation State Research Center – Institute of Biomedical Problems of the Russian Academy of Sciences (IMBP RAS), Moscow, Russia*

Abstract
Prospective plans for human exploration of the Moon assume robotic support of Extravehicular Activity (EVA) of the cosmonaut crew on the lunar surface. One of the main conditions for the safety of cosmonaut's operations in a spacesuit and his mobility when moving on the lunar surface is to maintain communication with other EVA-participants working remotely at lunar bases, with joint access to sources of relevant updatable information. Such information includes data from preliminary and up-to-dated mapping and routing of the terrain and data on localization of objects in the area of operations collected by lunar robots using onboard survey instruments directly in the area of operations. With limited EVA support for the lunar mission crew from the ground-based Mission Control Center (MCC in a mixed

crew-robot team may improve: communication among remotely dispersed crew members (including both on lunar bases and outside of hermetically sealed facilities on the lunar surface) regarding the collection and presentation of navigation data; compilation and display of visual data to provide crew members with joint access to the results of recognizing external environment objects, navigation and reference information, data on localization of objects in the cosmonaut's activity zone on the way out, warning information on possible risks of unplanned development of events; analysis of navigation information and information about collision risks when moving mobile lunar robots in the zone of EVA operations for emergency warning alarm signal for lunar mission crew members while near real-time interaction. One of the urgent problems is rational representation of a set of heterogeneous navigation data on spacesuit information display means using projection Head-Up Displays (HUDs) based on augmented reality (AR). The issues of increasing situational awareness of a cosmonaut in a spacesuit while performing EVA on the lunar surface through active application of AR-interface to control access to channels and sources of navigation and localization data on a single semantic basis are considered.

Key words
Lunar missions, extravehicular activities (EVA) the lunar surface, robotic crew support, joint operations, navigation and localization, human-robot interaction (HRI), virtual and augmented reality (VR/AR), spacesuit, wearable head-helmet (HUD), AR interface.

В свете проектов лунных миссий актуальны вопросы, будут ли отвечать требованиям надежности и безопасности ВКД экипажа на Луне проектируемые средства информационной поддержки экипажа, работающего на значительном удалении от ненамного Центра управления полетом (ЦУП), и каким образом смешанная команда космонавтов и мобильных роботов может обеспечивать при напланетной деятельности согласованное функционирование и навигацию, предупреждать коллизии при перемещении в неструктурированной среде, рационально расходовать ресурсы и осуществлять взаимную поддержку в незапланированных ситуациях [1]. Для того чтобы экипаж космонавтов мог оперативно принимать решения при перемещении космонавта в скафандре по лунной поверхности и при навигации лунного ровера необходимо найти рациональные способы информирования участников операции, выбрать способы связи и коммуникации, применять эффективные средства интерфейса в системе человек-роботы, направленные на поддержание ситуационной осведомленности в наиболее привычных (естественных) формах диалога [2,3]. Трудности дистанционного взаимодействия с автономными мобильными роботами (АМР) и получения данных о состоянии окружающей среды требует разработки средств информационного обеспечения с применением современных информационных технологий [3,4]. Ведущую роль в улучшении условий работы в смешанных командах экипаж – лунные роботы сегодня отводится технологиям создания виртуального окружения и поддержки оперативного общения с использованием многомодального интерфейса [4]. Возможности контролировать обстановку существенно определяются применяемыми средствами отображения информации (СОИ). В то время как на рабочих местах в Лунных базах и на лунном ровере космонавты могут оценить обстановку и осуществить доступ к структурированным справочным данным, используя электронные многофункциональные индикаторы и/или мониторы в режиме многоканального отображения информации, для космонавта в скафандре способ построения СОИ определяется конструкцией скафандра, и зависит от технологий визуализации [5].

Во многих странах продолжаются активные исследования технологий, связанных с виртуальной и дополненной реальностью (VR/AR), в частности, очков и шлемов VR/AR, AR-проекционных дисплеев и др. Не меньшее значение придается разработке структурированного контента для носимых мультимедийных средствах VR/AR с учетом ограничений человеческого фактора. Это достигается применением в современных гарнитурах VR/AR высокотехнологичных видов управления представления синтезированной виртуальной картины с помощью инерциальных систем для тренинга движения головы и айтрекинга для идентификации направления взгляда человека, дополненного распознаванием речевых команд [6,7,8].

Представляется целесообразным применять AR-интерфейс при реализации следующего состава действий космонавта в ходе ВКД:

- безопасного преодоления видимых препятствий в зоне двигательной активности с предварительным распознаванием, идентификацией и измерением расстояний до объектов естественного происхождения на поверхности, что становится критически важным фактором в случае пониженной видимости;
- периодического кругового обзора окружающего ландшафта без изменения положения тела космонавта и выполнения им поворотов, что предполагается достичь посредством управления с помощью жестовых команд, фиксацией направления взгляда с подтверждением речевой командой и др.;
- активного формирования безопасных и благоприятных условий для предотвращения рисков коллизий с сервисной поддержкой со стороны мобильных роботов, оборудованных прожекторами, устройствами изменения удалённости и размерности объектов естественного происхождения, а также средствами идентификации параметров движения;
- активного управления ходом диалога с группой поддержки посредством адресного указания абонента связи (коммуникации в группе), темы диалога и ключевых слов, срочности получения справки/инструкции,

перемещение указателя на маркер AR-интерфейса для переадресации на источники (на руководства и иллюстрации), включая инструкции выполнения предписанных действий;

– формирование экстренных сообщений о внеплановом развитии событий, возникших неполадках в работе скафандра, и предупреждений о риске негативных событий (снижении запаса кислорода, нарушении температурного режима и др.);

– формирование экстренных сообщений о нарушении состояния здоровья и/или показаниях к завершению (перепланированию) работ, исходя из данных в контуре обратной связи объективного медицинского контроля.

Среди значимых условий коллаборации можно выделить следующие:

– организация активного участия всей группы роботов в сборе информации для построения электронной карты местности в интересах точной локализации как самого космонавта, так и тех объектов, которые представляют для него опасность в плане коллизии при шаговом перемещении по поверхности,

– задание протоколов передачи сообщений между роботами в группе, для сбора, анализа и представления данных в непротиворечивом виде, что определяется требованиями к инструментам дальнометрии, системам компьютерного зрения, а также принятыми требованиями к точности навигационных измерений,

– передачу информации в таких объёмах и такой визуальной форме, чтобы не вызвать зрительное утомление и снижение когнитивных возможностей восприятия пространственной информации.

Заключение

Выполненный анализ состояния вопроса показал наличие технологий VR/AR, на которые можно ориентироваться при разработке технических, инженерно-психологических и психофизиологических требований к применению AR-интерфейса проекционных дисплеев, монтируемых в шлеме космического выходного скафандра для ВКД на поверхность Луны.

Практический эффект от внедрения AR-интерфейса ожидается в сфере улучшения условий взаимодействия экипажа космонавтов с группой лунных роботов за счёт более полного использования инструментария разведки и картографирования для предотвращения коллизий, возможности работы в группе с единым наглядным представлением навигационного контента, и, что особенно важно, улучшения условий ведения пространственной ориентировки космонавта в скафандре.

Вывод

Анализ возможностей применения технологии дополненной реальности позволяет заключить о перспективности разработок интуитивно понятных и визуально наглядных AR-интерфейсов для планирования задач и навигации человека при роботизированной поддержке при ВКД экипажа на лунной поверхности. На этой методической основе представляется правомерным сформулировать концептуальные представления о наличии технологий для улучшения условий взаимодействия экипажа космонавтов и группы мобильных роботов при построении AR-интерфейса в составе скафандра космонавта.

Литература

1. Проектирование взаимодействия человек–робот в составе единой команды космонавтов и автономных. мобильных роботов на поверхности Луны / А.А. Карпов, Б.И. Крючков, А.Л. Ронжин, В.М. Усов // Экстремальная робототехника. – Труды Международной научно-технической конференции. 2016. – №1 (27). – С. 71-81.

2. Юсупов Р.М., Крючков Б.И., Карпов А.А., Ронжин А.Л., Усов В.М. Возможности применения многомодальных интерфейсов на пилотируемом космическом комплексе для поддержания коммуникации космонавтов с мобильным роботом-помощником экипажа // Пилотируемые полеты в космос. – 2013. – Вып. 3(8). – С. 23–34.

3. Сергеев А.В., Юсупова А.Ю., Сергеев С.Ф. Мультимерные интерфейсы в активной управляющей индуцированной виртуальной среде // Робототехника и техническая кибернетика. – Т. 10. - № 4. – Санкт-Петербург: ЦНИИ РТК. – 2022. – С. 261-266. DOI: 10.31776/RTCJ.10403.

4. Сергеев С.Ф. [и др.] Виртуальные среды обучения в задачах освоения Луны с помощью роботов // Робототехника и техническая кибернетика. – Т. 8. – №3. – Санкт-Петербург : ЦНИИ РТК. – 2020. – С. 165-174. DOI: 10.31776/RTCJ.8301.

5. Калери, А.Ю. [и др.]. Проектирование системы отображения информации скафандра для внекорабельной деятельности / Калери А.Ю., Бронников С.В., Бубеев Ю.А., Рожков А.С., Исаев Г.Ф. // Космическая техника и технологии. – 2015. – №3(10). – С.81-88. DOI: https://sciup.org/14343490.

6. Keller, J. [et al.]. (2023). Using Virtual Reality to Envision Deployment of Spacesuit-Compatible Augmented Reality Displays for Lunar Surface Operations / J. Keller, M. (Lanssie) Ma, M. Noyes, D. Welsh // In: International Conference on Environmental Systems. July 2023. DOI: https://ttu-ir.tdl.org/handle/2346/94663.

7. Fang, H.C., Ong, S.K. and Nee, A.Y.C. (2014) A Novel Augmented Reality-Based Interface for Robot Path Planning. International Journal on Interactive Design and Manufacturing, 8, 33-42. DOI: https://doi.org/10.1007/s12008-013-0191-2.

8. Matour, M.-E., Winkler, A. (2023). Intuitive Robot Path Planning through Augmented Reality, 2023 27th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR), Międzyzdroje, Poland, 2023. pp. 27-32. DOI: 10.1109/MMAR58394.2023.10242522.

Информация об авторах

Куликов Игорь Николаевич, к.воен.н., доцент, в.н.с., научно-исследовательская лаборатория методологии отбора и подготовки космонавтов, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Научно-исследовательский испытательный центр подготовки космонавтов имени Ю.А. Гагарина» (НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина), Россия, 141160, Московская область, п. Звездный городок, ikul@mail.ru

Крючков Борис Иванович, д.т.н. начальник научно-исследовательской лаборатории методологии отбора и подготовки космонавтов, НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина, Россия, 141160, Московская область, п. Звездный городок, bik@mail.ru

Усов Виталий Михайлович, д.м.н., профессор, г.н.с., научно-исследовательская лаборатория методологии отбора и подготовки космонавтов, НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина, 1 Россия, 141160, Московская область, п. Звездный городок; в.н.с., отдел психофизиологии, нейрофизиологии и психофизиологии деятельности оператора, «Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Государственный научный центр Российской Федерации Институт медико-биологических проблем Российской академии наук» (ГНЦ РФ – ИМБП РАН), Россия, 123007, Москва, Хорошёвское шоссе, 76А, khoper.1946@gmail.com, ORCID: 0000-0001-9759-3444

Исследование влияния оптимизации регулируемой физической жёсткости шарниров манипулятора

И.В. Шардыко✉, В.В. Титов
Государственный научный центр Российской Федерации «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики» (ГНЦ РФ ЦНИИ РТК), Санкт-Петербург, Россия, i.shardyko@rtc.ru

Аннотация
В статье рассматривается вопрос оптимизации жёсткости шарниров манипулятора, оснащённых устройствами изменения жёсткости. Так как математически пространство шарниров и пространство задач манипулятора связаны нелинейно, реализовать произвольную жёсткость рабочей точки невозможно в условиях принципиально диагональной матрицы жёсткости шарниров, из чего следует вопрос подбора значений жёсткости шарниров, обеспечивающих максимальную близость результирующей жёсткости рабочей точки к желаемой, что также зависит от выбранного типа регулятора манипулятора. В работе предложена процедура оптимизации для одного распространённого типа регулятора, проведено исследование эффекта от оптимизации методом компьютерного эксперимента, сделаны выводы о практической применимости разработанной процедуры.

Ключевые слова
Робототехника, манипуляторы, система управления, приводы с переменной упругостью, оптимизация, импедансное управление, регулятор с сохранением упругой структуры.

Благодарности
Результаты были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России на 2024 год № 075-00697-24-00 "Исследования конструкций и разработка методов управления мехатронными узлами с переменной жёсткостью" (FNRG-2022-0009, регистрационный номер 1021060307688-8-2.2.2).

A Study on the Influence of the Variable Physical Stiffness Optimization of Robotic Arm

Igor V. Shardyko✉, Victor V. Titov
Russian state scientific center for robotics and technical cybernetics (RTC), St. Petersburg, Russia, i.shardyko@rtc.ru

Abstract
This article considers stiffness optimization of the robotic arm joints based upon variable stiffness actuators technology. As the Cartesian task space of a robotic arm is nonlinearly related to the joint space, arbitrary task space stiffness cannot be realized with strictly diagonal joint space stiffness, so the question arises, how to choose the stiffness of the joints to become as close to the desirable task space stiffness as possible, which also depends on the controller in use. In this paper an optimization procedure for one widespread type of controller is proposed, and the effect of optimization is investigated in simulation. The lessons learned in the study are formulated so one can decide if the proposed procedure is worth applying in the task.

Key words
Robotics, robotic arms, control system, variable stiffness actuators, optimization, impedance control, elastic structure preserving controller.

Acknowledgements
The work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation. State assignment №075-00697-24-00 (FNRG-2022-0009, ID 1021060307688-8-2.2.2).

Введение

Одним из основных направлений развития роботов в последние десятилетия стали роботы с механически упругими шарнирами [1,2], обеспечивающие бóльшую контактную безопасность при взаимодействии со средой и с человеком, а также более высокое качество управления контактными усилиями. Последнее связано с тем, что в данном случае контактные усилия вместо микродеформаций, характерных для традиционных жёстких манипуляторов, вызывают деформации пружин, достаточные для измерения датчиками положения. Через управление величиной деформации также удобно реализовывать и импедансное управление [3]. В целях повышения адаптивных свойств таких роботов создаются различные варианты шарниров с переменной жёсткостью [4], способных изменять выходную жёсткость непосредственно во время работы, для чего в каждом шарнире необходимо наличие минимум двух двигателей. Такие шарниры возникли в начале 2000х и получили

наименование шарниров с переменной упругостью/жёсткостью. Обзор ранних разработок, особенности классификации, технического описания и применения на практике можно найти в работах [5, 6].

Возможность регулирования жёсткости в некотором физически доступном диапазоне ставит вопрос о выборе оптимальных значений жёсткости в зависимости от потребностей конкретной задачи. Наиболее распространённой формой задания жёсткости является реализация жёсткости рабочей точки манипулятора в декартовом пространстве. Таким образом, в работе [7] для манипулятора DLR Hand Arm System был предложен регулятор, при применении статическая жёсткость манипулятора определялась совместно значениями физической и виртуальной (коэффициенты импедансного регулятора) жёсткости, для чего была предложена двухэтапная оптимизация. Однако, впоследствии был разработан более передовой регулятор ESπ – импедансный регулятор с сохранением упругой структуры (СУС) [8], - в котором статическая жёсткость определяется исключительно коэффициентами регулятора. Влияние механической жёсткости при работе данного регулятора сохраняется только во время переходного процесса, определяя характер и величину динамической ошибки. Соответственно, оптимизацию можно сократить до одного этапа, критерием которого выступает приближение декартовой матрицы жёсткости к желаемым значениям.

В настоящей работе влияние оптимизированной жёсткости шарниров на работу манипулятора было рассмотрено в двух задачах – отклонение рабочей точки манипулятора вследствие ступенчатого и синусоидального воздействий, приложенных в рабочей точке. Исследование проводилось методом компьютерного моделирования в системе Matlab-Simuink. В разделах ниже последовательно приведено математическое описание манипулятора с упругими шарнирами, процесс двухэтапной оптимизации для импедансного регулятора вида [9], описание импедансного СУС-регулятора и прямая одноэтапная оптимизация жёсткости для него, структура компьютерной модели и результаты проведённых экспериментов.

Математическая модель манипулятора с упругими шарнирами

Упругий манипулятор может быть упрощённо описан моделью с допущениями Спонга [10], представляющей собой систему ДУ:

$$\begin{cases} M(q)\ddot{q} + C(q,\dot{q})\dot{q} + g(q) = K_J(\theta - \mathrm{q}) = \tau \\ B\ddot{\theta} + K_J(\theta - \mathrm{q}) = \tau_m \end{cases}, \quad (1)$$

где q – обобщённые координаты (углы поворота шарниров), M(q) – матрица инерции жёсткого манипулятора, C(q,$\dot{q}$)– матрица центробежных и Кориолисовых сил, g(q) – вектор гравитационных сил, KJ – матрица жёсткости манипулятора, θ – углы поворота двигателей, приведённые к выходному валу шарниров, τ – упругий момент, B – матрица инерции роторов двигателей, τ_m – вектор крутящих моментов двигателей.

Упрощённая модель является значительно более пригодной для анализа объекта, а, следовательно, и для синтеза регулятора объекта. При этом допущения являются обоснованными для рассматриваемого манипулятора, в частности, в силу высоких передаточных чисел редукторов шарниров [11].

Жёсткость рабочей точки манипулятора в декартовом пространстве определяется как

$$K_C = -\frac{\partial f}{\partial x}, \quad (2)$$

где f – внешнее усилие, x – смещение РТМ.

С другой стороны, матрица жёсткости шарниров определяется как

$$K_J = \frac{\partial \tau}{\partial q} \quad (3)$$

В то время как момент шарниров и внешнее усилие связаны через якобиан манипулятора J:

$$\tau = J^T f \ , J(q) = \frac{\partial x(q)}{\partial q} \quad (4)$$

Если взять бесконечно малое смещение рабочей точки $\Delta x = x_d - x$, рассчитать соответствующую силу упругости, и с учётом (2) и (4) подставить результат в (3), то жёсткость шарниров можно записать как

$$K_J = J(q)^T K_C J(q) - \frac{\partial J(q)^T}{\partial q} K_C \Delta x, \quad (5)$$

при этом локально вблизи положения равновесия второе слагаемое можно принять равным нулю и использовать формулу только с первым слагаемым. Тогда можно достаточно просто выразить жёсткость рабочей точки:

$$K_C = \left(J(q)^T K_J^{-1} J(q)\right)^{-1} \quad (6)$$

Регулятор с сохранением упругой структуры

Обратной стороной внесения упругости в объект управления является то, что система становится недоактуированной [12] (две переменных состояния на один двигатель), вследствие чего в системе возникают неже-

лательные колебания. Для того чтобы их минимизировать и обеспечить удовлетворительное качество движения, было разработано множество алгоритмов управления в рамках различных подходов, например, [13-15]. Алгоритмы различаются областью применения, объёмом вычислений, степенью опоры на параметры модели (чувствительностью), степенью возможного изменения динамики системы, а также интуитивностью настройки регулятора. Для роботов с достаточно низкой жёсткостью шарниров интерес представляет группа алгоритмов с сохранением упругой структуры, отличающаяся минимальным изменением собственной динамики системы, низкой чувствительностью к параметрам модели и интуитивной настройкой, где параметры регулятора аналогичны физическим величинам. Идея регулятора заключается в переходе к эквивалентной модели, в которой энергия упругих колебаний шарниров диссипируется виртуальным демпфером либо в подсистеме робота, либо в подсистеме двигателя (первое и второе уравнение системы (1) соответственно). В случае импедансного регулятора демпфер размещается в уравнении двигателя (см. рис. 1). При этом в уравнении робота размещается виртуальная пружина с демпфером, выражающие желаемый импеданс при взаимодействии робота с внешними объектами.

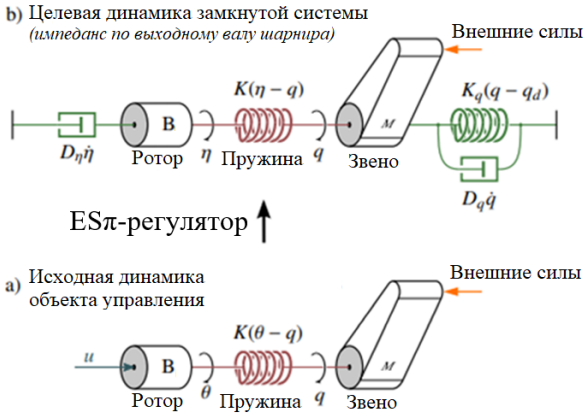


Рисунок 1 — Визуальное представление преобразования модели

Для того чтобы произвести переход к эквивалентной модели, вводится переменная, представляющая собой эквивалентное положение двигателя. Кроме того, чтобы можно было реализовать режим движения по траектории, удобно заменить величину угла поворота шарниров на отклонение от заданного угла поворота. В результате, замкнутая эквивалентная модель принимает вид:

$$\begin{cases} M\ddot{\tilde{q}} + C\dot{\tilde{q}} = K_J(\eta - \tilde{q}) + \tau_x \\ B\ddot{\eta} + K_J(\eta - \tilde{q}) = u = -D_\eta\dot{\eta}' \end{cases} \quad (7)$$

где $\tilde{q}(t)$=q-$q_d(t)$ – отклонение от заданного угла, η – эквивалентное положение двигателя, τ_x - момент, соответствующий желаемому импедансу, u – управляющий сигнал, D_η – коэффициент демпфирования в цепи двигателя. Момент импеданса рассчитывается как

$$\tau_x = -K_x\tilde{q} - D_x\dot{\tilde{q}}, \quad (8)$$

где K_x и D_x – матрицы виртуальной жёсткости и демпфирования рабочей точки в декартовом пространстве.

Сравнение систем (1) и (7) позволяет найти уравнения связи между оригинальной величиной положения двигателя и эквивалентным положением, в результате чего определяется итоговое уравнение работы регулятора:

$$\begin{cases} \tau_m = u + B\ddot{q}_d + BK_J^{-1}(\ddot{n}_1 + \ddot{n}_2) + n_1 + n_2 \\ n_1 = M\ddot{q}_d + C\dot{q}_d,\ n_2 = g + \tau_x \end{cases}, \quad (9)$$

Оптимизация жёсткости шарниров

Так как декартова жёсткость представляет собой в общем виде недиагональную матрицу, то и матрица жёсткости шарниров в общем виде будет являться недиагональной, что невозможно. Однако, можно определить некий оптимум для конкретных величин жёсткости шарниров, который будет зависеть от выбранного типа регулятора и критериев качества управления. Например, в работе [7], выбирается взвешенная норма Фробениуса, которая преобразуется в евклидову норму для применения метода наименьших квадратов с учётом физических ограничений. При этом при выборе регулятора как в [7] жёсткость шарниров влияет как на динамическую ошибку, так и на ошибку в установившемся режиме в ответ на действие внешней силы, из чего следует необходимость второго этапа оптимизации в виде поиска оптимальной матрицы виртуальной жёсткости.

В случае представленного выше регулятора СУС, статическая ошибка, как следует из (7), определяется только коэффициентами регулятора, но в динамическую ошибку вносит вклад и упругость шарниров. Таким образом, матрица жёсткости Kx задаётся непосредственно исходя из особенностей задачи, для оптимизации

же жёсткости шарниров можно выбрать критерий максимального приближения КС к Кх. Другими словами, требуется минимизировать функцию

$$\rho = \left\| K_C(k_J) - K_x \right\|, \quad (10)$$

где k_J – вектор значений жёсткости шарниров, с учётом ограничения

$$k_j^{min} < k_{j_i} < k_j^{max} \quad (11)$$

Нормой оптимизации также берётся взвешенная норма Фробениуса:

$$\|A\|_F^G = \sqrt{\sum_{i,j} g_{ij} a_{ij}^2}, \quad (12)$$

где g_{ij} – элементы весовой матрицы G. Для применения метода наименьших квадратов функция оптимизации представляется в евклидовой норме как

$$\left\| A \cdot c_J - b \right\|_2^G \quad (13)$$

Матрица A и вектор b содержат элементы матрицы (6), дифференцированные по вектору жёсткости, и элементы матрицы желаемой декартовой жёсткости, соответственно, записанные в вектор-столбец. Что касается весовой матрицы, возникает желание сформировать матрицу максимально диагональной, максимизировав веса диагональных элементов. Однако из этого следует, что внедиагональные элементы должны стремиться к нулю, что автоматически смещает оптимум в нижние значения допустимого диапазона. В связи с этим, все элементы весовой матрицы приняты равными 1.

Описание компьютерной модели

В качестве объекта исследования выбран шестистепенной манипулятор с классической угловой кинематической схемой, подобной манипулятору PUMA. Кинематические параметры манипулятора, записанные в модифицированной системе Денавита-Хартенберга [16] приведены в таблице 1. Последняя строка отвечает за положение системы координат (СК) рабочей точки относительно СК шарнира 6. Масса манипулятора 11,6 кг с учётом груза (схвата).

Исследование проводилось в среде Matlab-Simulink, где была реализована динамическая модель шестистепенного манипулятора с ШПУ, представленная на рисунках 2 и 3.

Таблица 1 — Кинематические параметры манипулятора

Номер шарнира (от основания)	Линейное смещение a, м	Линейное смещение d, м	Угловое смещение α, рад
1	0	0,16	0
2	0	0	-π/2
3	0,63	0	0
4	0	0,57	π/2
5	0	0	-π/2
6	0	0,195	π/2
7	0	0	0

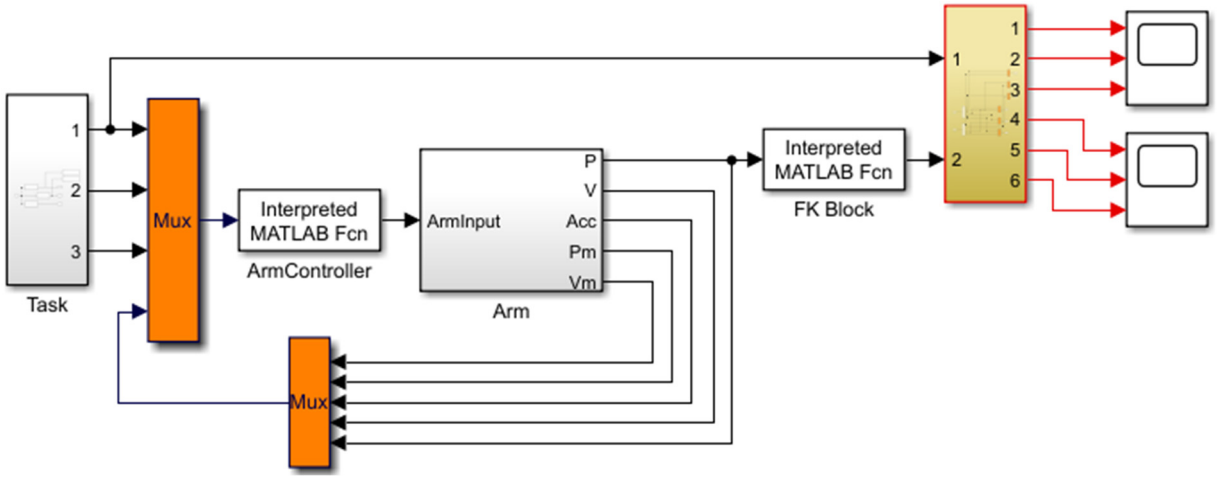


Рисунок 2 — Simulink-модель для проведения эксперимента (верхний уровень)

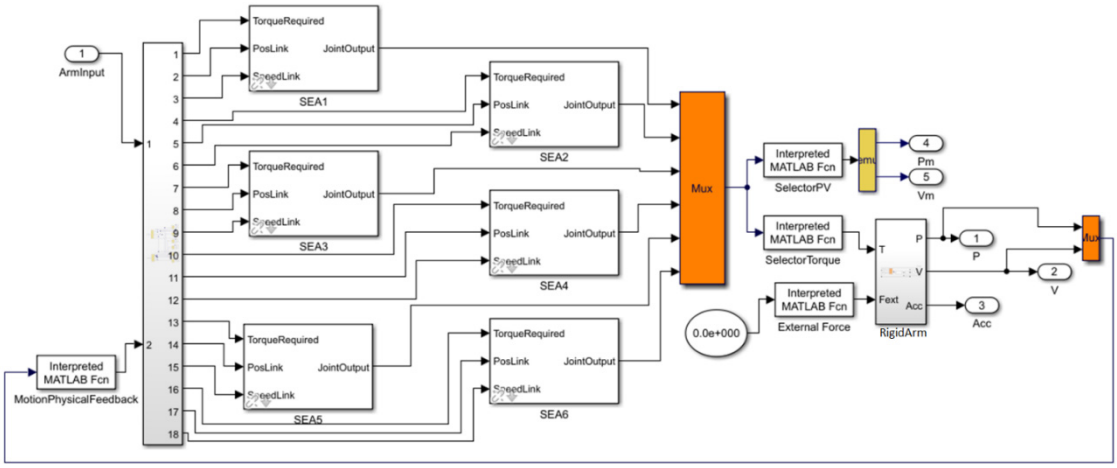


Рисунок 3 — Реализация манипулятора в модели

На рисунке 2 представлены следующие блоки: «Task» - блок подачи команды (траектории), «ArmController» - блок расчёта управляющих сигналов, «Arm» - блок реализации модели манипулятора, «FK block» - блок решения прямой задачи кинематики для удобства сравнения задания и фактического движения посредством вывода на графики. На рисунке 3 также можно видеть различные блоки: «ArmInput» принимает управляющие сигналы на приводы манипулятора, «SEAi» (где i от 1 до 6 – номер шарнира) – модели упругих шарниров, в которых можно задавать все параметры, представленные в уравнениях второго раздела, «SelectorPV» и «SelectorTorque» - примитивные блоки, обеспечивающие отбор соответствующих переменных с выхода моделей шарниров, «ExternalForce» реализует подачу внешнего воздействия по определённому закону, «RigidArm» реализует твердотельную модель манипулятора на основе встроенной функции Matlab «forwardDynamics».

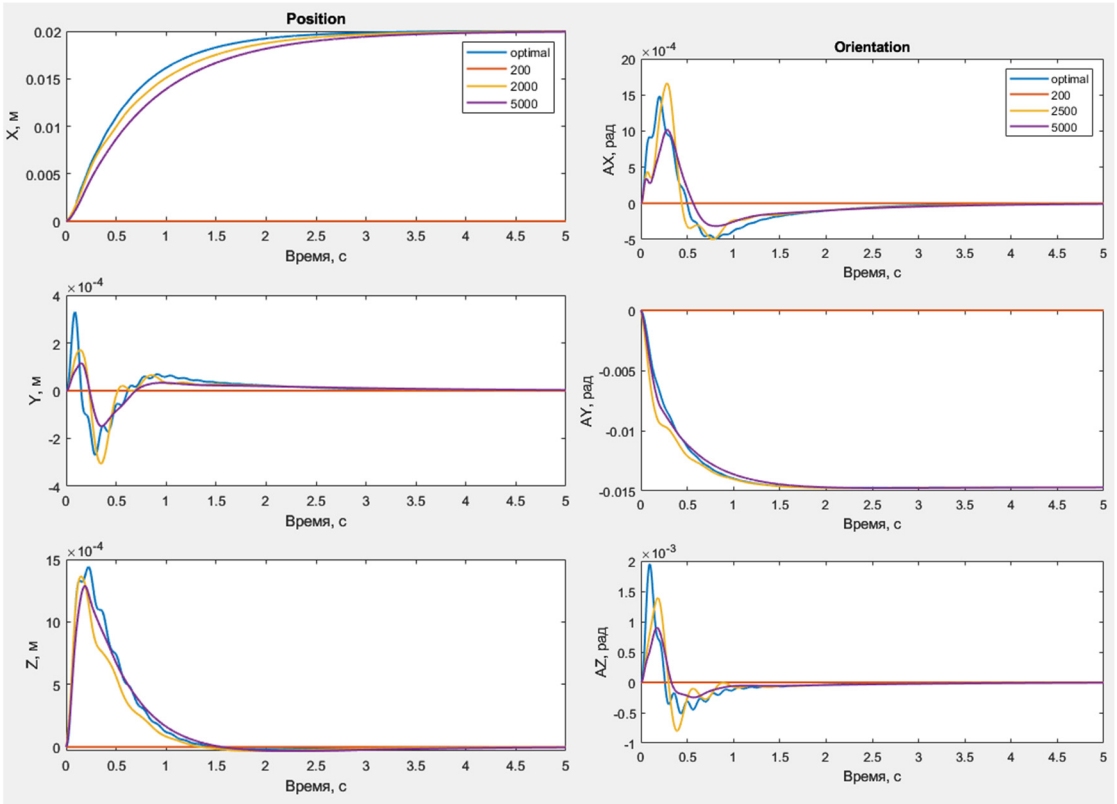


Рисунок 4 — Реакция манипулятора на ступенчатое внешнее воздействие

Первый эксперимент заключался в реакции манипулятора на внешнее воздействие ступенчатого типа с линейным фронтом возрастания, приложенное к рабочей точке вдоль оси X. Величина ступени – 20 Н, время нарастания – 0,2 с. Желаемая декартова жёсткость выбрана диагональной, вектор диагональных значений – (10^3, 10^4, 10^4, 10^3, 10^3, 10^3), где первые три значения здесь и далее соответствуют линейным степеням свободы (X,Y,Z, Н/м), а вторые три значения – угловым (OX, OY, OZ, Н·м/рад). Диапазон возможных значений жёсткости шарниров от 200 до 5000 Н·м/рад. Результаты представлены на рисунке 4.

Два последующих эксперимента проводились аналогичным образом, с тем отличием, что внешнее воздействие носило синусоидальный характер. Амплитуда силы составляла 20 Н, период 5 с. В первом случае желаемая декартовая жёсткость, как и в первом опыте, соответствовала вектору (10^3, 10^4, 10^4, 10^3, 10^3, 10^3), во втором случае была увеличена жёсткость по оси OX, т.е. вектор (10^4, 10^4, 10^4, 10^3, 10^3, 10^3). Результаты приведены на рис. 5 и рис. 6 соответственно.

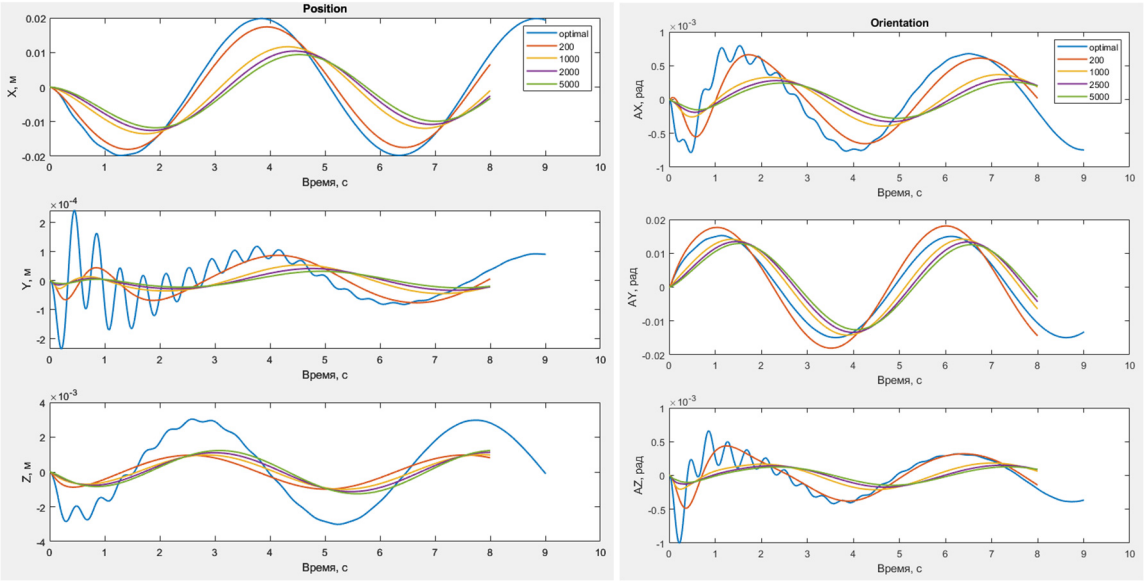


Рисунок 5 — Реакция манипулятора на синусоидальное внешнее воздействие с пониженной жёсткостью вдоль оси X

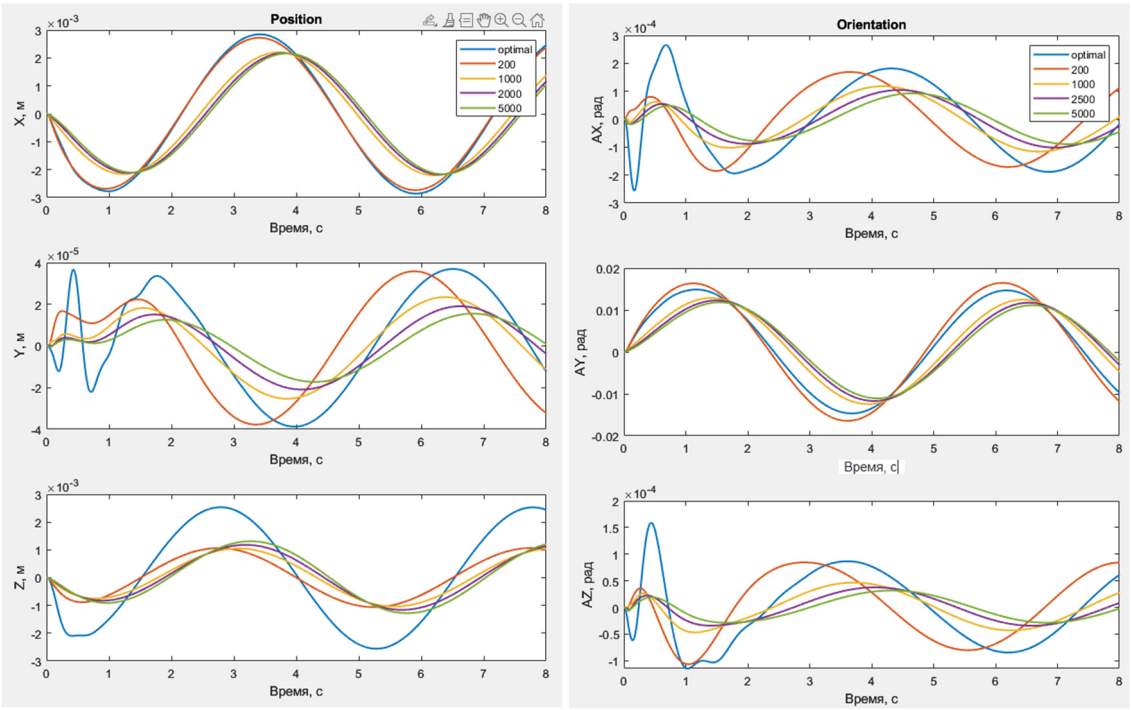


Рисунок 6 — Реакция манипулятора на синусоидальное внешнее воздействие с повышенной жёсткостью вдоль оси X

По результатам экспериментов можно сделать следующие выводы. В случае ступенчатого воздействия оптимальный подбор значений жёсткости обеспечивает максимальное быстродействие, но разница в быстродействии оказывается минимальной, при этом наблюдаются высокочастотные колебания, которые, тем не менее, быстро затухают. В случае синусоидальных воздействий при оптимальной жёсткости наблюдается максимальная полоса пропускания, фактическая жёсткость по рабочей оси (X) совпадает с заданной. При всех настройках наблюдается сцепление координат (взаимовлияние осей), т.е. при отсутствии силы по иным осям, колебания присутствуют. При этом при оптимальных значениях амплитуда этих колебаний максимальная либо близка к ней. Как итог, по проведённым экспериментам нельзя сделать однозначный вывод о пользе

оптимизации жёсткости шарниров. Тем не менее, оптимизация обладает тремя достоинствами: уже упомянутыми максимальным быстродействием и полосой пропускания, а также гарантированным подбором адекватных значений жёсткости в сценариях, когда отсутствует интуитивное понимание выбора значений. Также интерес представляет дополнительное исследование, а именно, задача, в которой происходит движение манипулятора, приводящее к столкновению с внешней средой.

Заключение

В данной статье исследован вопрос практической применимости оптимизации жёсткости шарниров манипулятора, в которых жёсткость может изменяться в определённых пределах. С учётом того, что оптимизация как таковая зависит от регулятора манипулятора, был выбран конкретный тип регулятора – с сохранением упругой структуры (ESP/ESπ). С учётом особенностей данного регулятора была разработана процедура оптимизации и проверена её работоспособность на примере последовательного шестистепенного манипулятора в рамках компьютерного эксперимента. Результаты показали, что оптимизация даёт некоторый полезный эффект, но весьма незначительный, при этом имеются и отрицательные проявления. В ходе работ возник интерес к исследованию ещё одной группы задач – соударения с жёсткой стенкой, как с известным положением, так и с заранее неизвестным расположением стенки. Данное исследование планируется в рамках развития работ в будущем.

Литература

1. Pratt J., Krupp B., Morse C. Series elastic actuators for high fidelity force control // Industrial Robot: An International Journal. – 2002. – Vol. 29. – №3. – pp. 234-241.
2. Haddadin S. et al. The franka emika robot: A reference platform for robotics research and education //IEEE Robotics & Automation Magazine. – 2022. – Т. 29. – №. 2. – С. 46-64.
3. Pratt G. A. et al. Late motor processing in low-impedance robots: Impedance control of series-elastic actuators // Proceedings of the 2004 American control conference. – IEEE, 2004. – VOL.4. – pp. 3245-3251.
4. Albu-Schäffer A. et al. Anthropomorphic soft robotics–from torque control to variable intrinsic compliance //Robotics Research: The 14th International Symposium ISRR. – Springer Berlin Heidelberg, 2011. – С. 185-207.
5. Vanderborght B. et al. Variable impedance actuators: A review // Robotics and autonomous sys-tems. – 2013. – Vol. 61. – №12. – pp. 1601-1614.
6. Grioli G. et al. Variable stiffness actuators: The user's point of view // The International Journal of Robotics Research. – 2015. – Vol. 34. – №6. – pp. 727-743.
7. Petit F., Albu-Schäffer A. Cartesian impedance control for a variable stiffness robot arm //2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. – IEEE, 2011. – С. 4180-4186.
8. Keppler M. et al. Elastic structure preserving impedance (ESπ) control for compliantly actuated robots //2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). – IEEE, 2018. – С. 5861-5868.
9. Ott C. et al. On the passivity-based impedance control of flexible joint robots // IEEE Transactions on Robotics. – 2008. – Vol. 24. – №2. – pp. 416-429.
10. Spong M. W. Modeling and control of elastic joint robots // Journal of dynamic systems, measurement, and control. – 1987. – Vol. 109. – №4. – pp. 310-319.
11. Ott C. Cartesian Impedance Control of Redundant and Flexible-Joint Robots. – Springer Science & Business Media, 2008. – Т. 49.
12. Keppler M. From Underactuation to Quasi-Full Actuation: A Unifying Control Framework for Rigid and Elastic Joint Robots : дис. – Technical University of Munich, 2023.
13. Avila-Becerril S., Loría A., Panteley E. Global position-feedback tracking control of flexible-joint robots // 2016 American Control Conference (ACC). – IEEE, 2016. – pp. 3008-3013.
14. Keppler M. et al. A passivity-based approach for trajectory tracking and link-side damping of compliantly actuated robots // 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). – IEEE, 2016. – pp. 1079-1086.
15. Ott C. et al. Decoupling based Cartesian impedance control of flexible joint robots //2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No. 03CH37422). – IEEE, 2003. – Vol. 3. – pp. 3101-3107.
16. Siciliano B., Khatib O. Robotics and the Handbook //Springer Handbook of Robotics. – Cham : Springer International Publishing, 2016.

Информация об авторах

Шардыко Игорь Вячеславович, н.с., Государственный научный центр Российской Федерации «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики» (ГНЦ РФ ЦНИИ РТК), Россия, 194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 21, i.shardyko@rtc.ru, ORCID: 0000-0003-0622-9896

Титов Виктор Викторович, н.с., ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Россия, 194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 21, vtitov@rtc.ru, ORCID: 0000-0003-2817-5841

Применение метода наименьших квадратов для нахождения взаиморасположения осей вращения двухосной поворотной платформы

Т.П. Романенко, В.В. Варлашин✉, Н.В. Заруцкий
Государственный научный центр Российской Федерации «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики» (ГНЦ РФ ЦНИИ РТК), Санкт-Петербург, Россия, v.varlashin@rtc.ru

Аннотация
В работе представлен метод обработки экспериментальных данных, основанный на методе наименьших квадратов. МО позволяет рассчитать по облаку точек, лежащих на траектории движения объекта по окружности, центр окружности и точку, смещённую вдоль оси вращения, для расчёта взаиморасположения осей вращения двухосной поворотной платформы. Для оценки погрешности измерений метода обработки реализован метод генерации тестовых данных. Метод генерирует облако точек, лежащих на траектории движения объекта по окружности, с добавлением случайной погрешности к координатам этих точек, задаваемой равномерной функцией распределения плотности вероятности. Точка, наблюдаемая во время проведения эксперимента, задана в программном обеспечении Vicon Tracker и связана с полезной нагрузкой, закреплённой на консоли двухосной поворотной платформы. Реализован метод расчёта, который с помощью геометрических преобразований оценивает взаиморасположение осей. В работе приведены гипотеза о движении точки, связанной с полезной нагрузкой в программном обеспечении Vicon Tracker, основные формулы для методов и результаты экспериментов.

Ключевые слова
Система захвата движения, система координат, метод наименьших квадратов, математическое ожидание, случайная погрешность, матрица однородных преобразований.

Application of the method of least squares to the determination of the relative positions of the axes of rotation of a biaxial rotary platform

Taras P. Romanenko, Viktor V. Varlashin✉, Nikolay V. Zarutsky
Russian state scientific center for robotics and technical cybernetics (RTC), St. Petersburg, Russia, v.varlashin@rtc.ru

Abstract
The report presents the method for processing experimental data based on the method least squares. The method for processing allows to calculate, from a cloud of points lying on the trajectory of movement of an object along a circle, the centre of the circle and a point shifted along the axis of rotation to calculate the relative positions of the axes of rotation of a two-axis rotating platform. To estimate the measurement error of the method for processing, a measurement data generation method is implemented. The method generates a cloud of points lying on the trajectory of the object's movement along a circle and adds a random error to the coordinates of these points, specified by a uniform probability density distribution function. The point observed during the experiment is specified in the Vicon Tracker software and connected to the payload attached to the two-axis rotating platform console. A computational method is implemented to estimate the relative position of the axes using geometric transformations. The report presents a hypothesis about the motion of a point associated with the payload in the Vicon Tracker software, the main formulas of the methods, and the results of the experiments.

Key words
Motion capture system, coordinate system, least squares method, mathematical expectation, random error, homogeneous transformation matrix.

Введение

Рассмотрены опорно-поворотные устройства, использующиеся для наведения по двум углам наведения полезной нагрузки (ПН). Данные устройства имеют небольшие отклонения в своей конструкции, и в некоторых работах, требующих высокую точность, эти отклонения могут вносить большие погрешности. Для уменьшения влияния конструкционных отклонений вносятся поправки в программу наведения. Для этого необходимо идентифицировать оси вращения таких устройств.

Двухосная поворотная платформа (ПП) (рис. 1) предназначена для наведения ПН по двум взаимно перпендикулярным осям «α» и «β». ПП содержит два отдельных привода наведения ПН, каждый из которых обеспечивает поворот ПН относительно одной оси (α или β). В процессе разработки и отладки требуется

вычислить взаимное расположение осей вращения «α» и «β» для введения поправок в управляющую программу, пересчитывающую заданную траекторию скольжения точки наведения в углы поворота шарниров ПП. При разработке метода рассматривались статьи со схожими задачами [1-3] по определению центра и оси вращения с использованием метода наименьших квадратов (МНК), но не рассматривающие вопросы определения взаимного расположения осей.

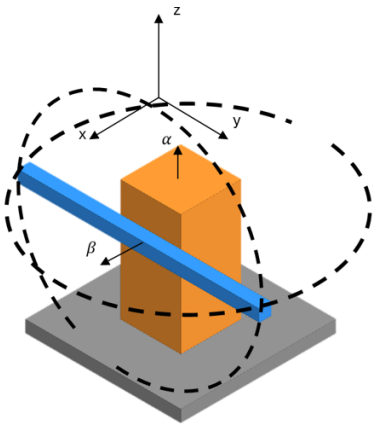


Рисунок 1 — Схематичное изображение траектории движения наблюдаемых точек, связанных с полезной нагрузкой и ПП

Метод обработки

Для обработки экспериментальных данных необходим метод, позволяющий оценить оси вращения ПП по измерениям, полученным с помощью системы захвата движения, для нахождения их взаиморасположения. Исходя из схемы движении ПП (см. рис. 1), предполагается, что движение точки, связанной с ПН в программном обеспечении Vicon Tracker, происходит по окружности вокруг осей «α» и «β» в декартовой системе отсчёта в плоскости, смещённой относительно одной из трёх плоскостей (для вертикальной оси – XOY, для горизонтальной оси – ZOY или ZOX) и последовательно повёрнутой вокруг двух осей координат (для вертикальной оси – повороты XYZ, для горизонтальной оси YZX или ZXY).

Имеются облака точек, лежащих на окружности, с набором координат (x_i^w,y_i^w,z_i^w), где $i \in [1, N]$, N – количество кадров, полученное в ходе эксперимента. По облаку точек необходимо оценить две точки, через которые проходит ось вращения. С помощью математических преобразований из полного канонического уравнения плоскости $Ax + By + Cz + D = 0$ получено выражение одной из координат через две другие:

$$x = a_x z + b_x y + c_x,$$

где $a_x = -\frac{C}{A}; b_x = -\frac{B}{A}; c_x = -\frac{D}{A}$.

Коэффициенты вычислены при решении задачи оптимизации с использованием МНК:

$$F(a_x, b_x, c_x) = \sum_{i=1}^{N}(a_x z_i^w + b_x y_i^w + c_x - x_i^w)^2 \rightarrow min, \quad (1)$$

где $F(a_x, b_x, c_x)$ – функция суммы квадратов разности.

Уравнения и решения для двух других случаев аналогичны. Для решения задачи оптимизации МНК взяты частные производные от выражения (1) по каждому из коэффициентов. Затем полученная система линейных алгебраических уравнений решена по методу Гаусса. Также рассматривался вариант с использование RANSAC [5], но после проведения эксперимента и первичной обработки экспериментальных данных грубых погрешностей измерения положения не было, поэтому для решения задачи достаточно МНК.

По полученным коэффициентам плоскости выражены углы, на которые система отсчёта объекта повёрнута относительно мировой системы отсчёта (см. рис. 2).

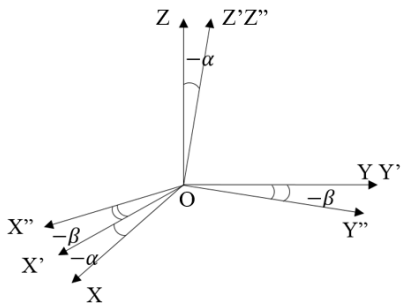


Рисунок 2 — Поворот системы координат вокруг осей OY и OZ'

Зная порядок поворотов для системы отсчёта объекта относительно мировой системы отсчёта и матрицы поворота, а также координаты вектора нормали плоскости Z"OY" в локальной системе координат, найдены координаты вектора нормали плоскости Z"OY" в мировой системе координат:

$$Ry(\alpha)\cdot Rz(\beta)\cdot N_l^l = \begin{pmatrix}\cos\alpha & 0 & \sin\alpha\\ 0 & 1 & 0\\ -\sin\alpha & 0 & \cos\alpha\end{pmatrix}\cdot\begin{pmatrix}\cos\beta & -\sin\beta & 0\\ \sin\beta & \cos\beta & 0\\ 0 & 0 & 1\end{pmatrix}\cdot\begin{pmatrix}1\\0\\0\end{pmatrix} =$$
$$= \begin{pmatrix}\cos(\alpha)\cdot\cos(\beta) & -\cos(\alpha)\cdot\sin(\beta) & \sin(\alpha)\\ \sin(\beta) & \cos(\beta) & 0\\ -\sin(\alpha)\cdot\cos(\beta) & \sin(\alpha)\cdot\sin(\beta) & \cos(\alpha)\end{pmatrix}\cdot\begin{pmatrix}1\\0\\0\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}\cos(\alpha)\cdot\cos(\beta)\\ \sin(\beta)\\ -\sin(\alpha)\cdot\cos(\beta)\end{pmatrix} = N_l^w, \quad (2)$$

где N_l^l – вектор нормали плоскости Z"OY" в локальной системе координат; N_l^w – вектор нормаль плоскости Z"OY" в мировой системы координат.

Зная вектор нормали (2), вычислили углы поворотов, выраженные из коэффициентов:

$$N_l^w = \begin{pmatrix}\cos(\alpha)\cdot\cos(\beta)\\ \sin(\beta)\\ -\sin(\alpha)\cdot\cos(\beta)\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}A_l\\B_l\\C_l\end{pmatrix},$$

где $\beta = \sin^{-1}(B_l)$,

$$\frac{C_l}{A_l} = \frac{-\sin(\alpha)\cdot\cos(\beta)}{\cos(\alpha)\cdot\cos(\beta)} = \frac{-\sin(\alpha)}{\cos(\alpha)} = -\tan(\alpha) \to \alpha = \tan^{-1}\left(-\frac{C_l}{A_l}\right).$$

По матрице поворотов и вектору смещения вычислена матрица однородных преобразований, а также обратная ей матрица:

$$\mathrm{M} = \begin{pmatrix}\cos(\alpha)\cdot\cos(\beta) & -\cos(\alpha)\cdot\sin(\beta) & \sin(\alpha) & \mathrm{c}_x\\ \sin(\beta) & \cos(\beta) & 0 & 0\\ -\sin(\alpha)\cdot\cos(\beta) & \sin(\alpha)\cdot\sin(\beta) & \cos(\alpha) & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{pmatrix},$$

$$M^{-1} = \begin{pmatrix}\cos(\alpha)\cdot\cos(\beta) & \sin(\beta) & -\sin(\alpha)\cdot\cos(\beta) & -\mathrm{c}_x\cdot\cos(\alpha)\cdot\cos(\beta)\\ -\cos(\alpha)\cdot\sin(\beta) & \cos(\beta) & \sin(\alpha)\cdot\sin(\beta) & \mathrm{c}_x\cdot\cos(\alpha)\cdot\sin(\beta)\\ \sin(\alpha) & 0 & \cos(\alpha) & -\mathrm{c}_x\cdot\sin(\alpha)\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{pmatrix}.$$

Зная координаты точки объекта в мировой системе координат, вычислены координаты точки объекта в локальной системе отсчёта:

$$\begin{pmatrix}x_i^l\\ y_i^l\\ z_i^l\\ 1\end{pmatrix} = M^{-1}\cdot\begin{pmatrix}x_i^w\\ y_i^w\\ z_i^w\\ 1\end{pmatrix},$$

где x_i^l, y_i^l, z_i^l – координаты точки объекта в локальной системе координат.

Для вычисления радиуса окружности, а также центра окружности, все точки спроецировали на плоскость ($x_i^l = 0$). В формулах (3) и (4) представлен каноничный вид уравнения окружности в данной плоскости:

$$(z - z_0)^2 + (y - y_0)^2 - R^2 = 0, \quad (3)$$

$$z^2 + y^2 - 2zz_0 - 2yy_0 + {z_0}^2 + {y_0}^2 - R^2 = 0. \quad (4)$$

Вычисляем центр и радиус окружности при решении задачи оптимизации (5), решение которой находим, используя МНК:

$$\sum_{j=1}^{k}\left(e(z_j, y_j)\right)^2 \to min, \quad (5)$$

где $e(z_j, y_j) = {z_j}^2 + {y_j}^2 - 2z_jz_0 - 2y_jy_0 + {z_0}^2 + {y_0}^2 - R^2 = 0$ – функция ошибки аппроксимации; $j = 1 \dots k$, k – количество точек, шт.

Задача оптимизации (5) имеет только одно решение, так как функция имеет вид параболы, и чтобы найти её минимум, приравняли нулю частные производные суммы квадратов функции ошибки от искомых параметров. В ходе решения получены координаты центра (z_0, y_0) окружности и радиус R. Также для построения прямой оси вращения объекта в пространстве вычислена вторая точка, лежащая вдоль оси вращения на расстоянии d. Затем координаты преобразованы обратно из локальной системы исчисления в мировую для обеих точек.

Метод генерации

Во время проведения эксперимента могут возникать различные посторонние блики и перекрытия наблюдаемых маркеров. Все эти факторы вносят погрешность в координаты точки, закреплённой за ПН. Соответственно необходимо проверить МО с учётом случайных погрешностей. Для этого реализован МГ. Метод позволяет сгенерировать облако точек по задаваемым параметрам, затем добавить случайную погрешность к координатам точек, имитируя реальные случайные отклонения при записи эксперимента. Полученные точки обрабатываются с помощью МО, после чего вычисляется разница между заданными значениями и полученными.

Для генерации однородных координат точек окружности задаём локальную систему координат, в которой мы сгенерируем координаты точек. Для вертикальной оси матрица преобразований из мировой в локальную систему координат имеет следующий вид:

$$\mathrm{M}_g = \begin{pmatrix} cos(h) & 0 & -\sin(h) & l_2 \cdot \sin(h) \\ \sin(h) \cdot \sin(q) & \cos(q) & \sin(q) \cdot \cos(h) & -l_2 \cdot \sin(q) \cdot \cos(h) \\ \cos(q) \cdot \sin(h) & -\sin(q) & \cos(q) \cdot \cos(h) & -l_2 \cdot \cos(q) \cdot \cos(h) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

где h – угол поворота вокруг оси OY; q – угол поворота вокруг оси OX'; l2 – смещение вдоль оси OZ.

Для горизонтальной оси матрица преобразований рассчитана аналогично. Для генерации облака точек в локальной системе координат воспользовались формулами:

$$t_f = (f-1)/v,$$

$$Ang_f = \frac{Ang_0 + (t_f \cdot u)}{180°} \cdot \pi,$$

$$z_f^s = R \cdot \sin(Ang_f),$$

$$y_f^s = R \cdot \cos(Ang_f),$$

$$x_f^s = l,$$

$$w_f^s = 1,$$

где u – скорость изменения угла, °/с; R – радиус окружности, мм; l – смещение вдоль оси OX локальной системы отсчёта, мм; Ang_0 – начальный угол, градусы; f = 1..q, q – количество измерений, шт, t_f – время при f-ом измерении, с, Ang_f – значение угла, в момент времени tf, градусы w_f^s – множитель однородных координат; v – количество кадров в секунду. Скорость, радиус и начальный угол и количество измерений заданы нами.

В формуле (6) представлено преобразование координат точки (x_f^s, y_f^s, z_f^s) локальной системы координат в координаты точки (x_f^m, y_f^m, z_f^m) мировой системы координат:

$$\begin{pmatrix} x_f^m \\ y_f^m \\ z_f^m \\ w_f^m \end{pmatrix} = M_g \cdot \begin{pmatrix} x_f^s \\ y_f^s \\ z_f^s \\ w_f^s \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Затем к координатам точки (x_f^m, y_f^m, z_f^m), добавлена случайная ошибка, имеющая непрерывную равномерную функцию распределения в диапазоне от f_a = -0,5 мм до f_b = 0,5 мм, и имеющая функцию плотности вероятности $f(x) = \frac{1}{f_b - f_a}$, где $x \in [f_a, f_b]$.

Расчёт случайно погрешности

Для вертикальной оси. С помощью МГ облака точек мы сгенерировали 1000 облаков точек, состоящих из 84001 точек со скорость 1°/с, начальным углом минус 175° и радиусом 900 мм, входные данные для каждого набора одинаковы. Получены ось вращения, а также координата центра вращения с помощью МО, описанного в данной статье. Для уравнения плоскости с зависимостью y от z и x рассчитана погрешность:

- вдоль оси OX: 0.0089 мм;
- вдоль оси OY: 0,0010 мм;
- вдоль оси OZ: 0,0180 мм.

Для уравнения плоскости с зависимостью x от z и y рассчитана погрешность:

- вдоль оси OX: 0.0053 мм;
- вдоль оси OY: 0,0004 мм;
- вдоль оси OZ: 0,0052 мм.

Для горизонтальной оси. С помощью МГ облака точек мы сгенерировали 1000 облаков точек, состоящих из 84001 точек со скорость 1°/с, начальным углом минус 175° и радиусом 900 мм, входные данные для каждого набора одинаковы. Получены ось вращения, а также координата центра вращения с помощью МО, описанного в данной статье. Для координат центра вращения оси рассчитана случайная погрешность:

- вдоль оси OX: 0.0093 мм;
- вдоль оси OY: 0,00086 мм;
- вдоль оси OZ: 0,00019 мм.

Расчёт взаимного расположения осей с помощью метода расчёта (МР)

Для расчёта взаимного расположения осей разработан МР, основанный на геометрических формулах и преобразованиях. Расстояние между двумя скрещивающимися прямыми можно принять за длину перпендикуляра, опущенного из точки, принадлежащей одной из прямых, к плоскости, проходящей через вторую прямую и параллельную первой. В формулах (7-10) заданы координаты точек прямых A_1B_1 и A_2B_2 (см. рис. 3) найденные нами после проведения экспериментов и расчётов в общем виде:

$$A_1 = (x_{A1}, y_{A1}, z_{A1}), \quad (7)$$

$$B_1 = (x_{B1}, y_{B1}, z_{B1}), \quad (8)$$

$$A_2 = (x_{A2}, y_{A2}, z_{A2}), \quad (9)$$

$$B_2 = (x_{B2}, y_{B2}, z_{B2}), \quad (10)$$

где A1, B1– точки, лежащие на прямой A1B1; A2, B2– точки, лежащие на прямой A2B2.

Расстояние между скрещивающимися прямыми вычисляется по формуле:

$$N_{AB} = |n_{12} \cdot (\cos\delta \cdot x_{A1} + \cos\theta \cdot y_{A1} + \cos\mu \cdot z_{A1} - p_{AB})|,$$

где $\cos\delta = (y_{B1} - y_{A1})(z_{B2} - z_{A2}) - (z_{B1} - z_{A1})(y_{B2} - y_{A2})$;

$$\cos\theta = (z_{B1} - z_{A1})(x_{B2} - x_{A2}) - (x_{B1} - x_{A1})(z_{B2} - z_{A2});$$

$$\cos\mu = (x_{B1} - x_{A1})(y_{B2} - y_{A2}) - (y_{B1} - y_{A1})(x_{B2} - x_{A2});$$

$$p_{AB} = \cos\delta \cdot x_{A2} + \cos\theta \cdot y_{A2} + \cos\mu \cdot z_{A2};$$

$$n_{12} = \frac{1}{\sqrt{\cos(\delta)^2 + \cos(\theta)^2 + \cos(\mu)^2}}.$$

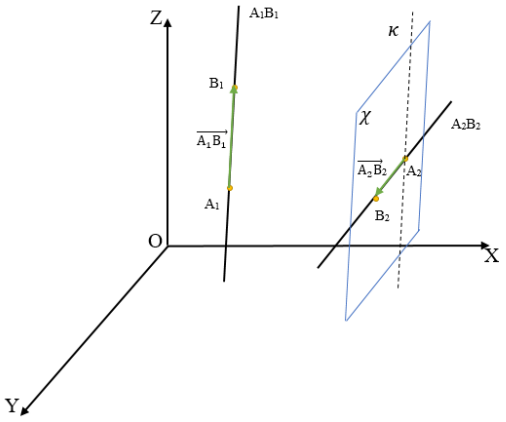


Рисунок 3 — Расположение прямых

Для расчёта угла между скрещивающимися прямыми построим локальную тройку направляющих векторов. Для этого с помощью векторного умножения $\overrightarrow{A_1B_1}$ на $\vec{N}$, где $\vec{N} = \overrightarrow{A_1B_1} \times \overrightarrow{A_2B_2}$, получим вектор $\vec{k}$. По этим трём векторам зададим локальную систему исчисления. Так как $\overrightarrow{A_2B_2}$ перпендикулярен $\vec{N}$ то искомый угол τ будет между векторами $\overrightarrow{A_2B_2}$ и $\vec{k}$, найденный по формуле:

$$\tau = \cos^{-1}\left(\frac{\vec{k} \cdot \overrightarrow{A_1B_1}}{|\vec{k}| \cdot |\overrightarrow{A_1B_1}|}\right)$$

Для проверки МР в программном обеспечении КОМПАС-3D v21 по точкам, полученным при обработке экспериментов при помощи МО, построены две оси вращения «α» и «β». После построения прямых и приме-

нения инструментов программного обеспечения были вычислены расстояние и углы проекций пересекающихся прямых. Для значения расстояния точность составила 10^{-8} в мм, для углов точность составила 10^{-3} градусов. Таким образом, можем считать, что метод верно рассчитывает взаиморасположение двух пересекающихся осей в пространстве.

Для проверки влияния случайной погрешности на МР, используя МГ, получены 1000 облаков точек для вертикальной оси, 1000 точек для горизонтальной оси в положении 0°, 1000 облаков точек для положения минус 90° и 1000 облаков точек в положении плюс 90°. Затем, с помощью МО, получены из этих облаков пары точек и с помощью МР получены 3 миллиона значений расстояний между прямыми и 3 миллиона значений углов. Определена случайная погрешность 0,0022 мм для расчёта расстояния между прямыми и 0,0000015 радиан для расчёта углов для всех трёх положений.

Эксперимент

В состав установки для проведения эксперимента вошли семь камер Vicon Vero 2.2, светоотражающие маркеры, ПП, имитация полезной нагрузку, два сетевых коммутатора, компьютер с операционной системой Windows. В качестве программного обеспечения (ПО) использовались Vicon Tracker 3.3, Matlab R2016b.

Проведены и записаны 34 эксперимента, в девяти из которых производился поворот вокруг вертикальной оси со скоростью 1°/с от 0° до плюс 175°, от плюс 175° до минус 175° и от минус 175° до 0°, при этом горизонтальная ось жёстко зафиксирована. Затем по пять экспериментов, в пяти положениях угла горизонтального поворота (-175°, -90°, 0°, 90°, 175°). При этом задавалось вращение полезной нагрузки вокруг горизонтальной оси в диапазоне углов от 0° до 175°, затем от 175° до -175° и от -175° до 0°, со скоростью 1°/с.

В результате проведения эксперимента и обработки экспериментальных данных получены массив углов и массив расстояний между осями. Для этих значений были вычислены средние значения и случайная погрешность измерения. Для расстояний между скрещивающимися прямыми среднее значение составило 0,789 мм, и случайная погрешность составила 0,100 мм. Для углов среднее значение составило 0,01675 радиан и случайная погрешность составила 0,00122 радиана.

Заключение

По мере развития новых технологий появляются и новые методики проведения экспериментов. Целью этой работы являлась демонстрация возможности применения системы захвата движения на основе Vicon для проведения экспериментов и снятия данных, для последующей обработки и нахождения взаимного расположения осей вращения ПП, а также разработка методики, позволяющей это сделать.

Проведена работа по калибровке системы захвата движения, проведены эксперименты и получены облака точек. Предложена методика обработки экспериментальных данных для нахождения горизонтальной и вертикальной осей. Для проверки и вычисления случайной погрешности применения методики на зашумлённых данных разработан и применён метод генерации данных по заданным параметрам (центр вращения, начальный угол, скорость вращения, количество измерений, матрица однородных преобразований, радиус).

Результатом проделанной работы является результат расчета влияния случайной погрешности на определение центров вращения осей, а также положения осей вращения и их взаимное расположение в пространстве. Применение системы Vicon показало свою результативность.

Литература

1. Cereatti A., Camomilla V., Cappozzo A. Estimation of the centre of rotation: a methodological contribution // Journal of Biomechanics. – 2004. – Т. 37. – №. 3. – С. 413-416. Doi: 10.1016/S0021-9290(03)00264-1

2. Halvorsen K., Lesser M., Lundberg A. A new method for estimating the axis of rotation and the center of rotation //Journal of biomechanics. – 1999. – Т. 32. – №. 11. – С. 1221-1227. Doi: 10.1016/S0021-9290(99)00120-7.

3. Gamage S. S. H. U., Lasenby J. New least squares solutions for estimating the average centre of rotation and the axis of rotation // Journal of biomechanics. – 2002. – Т. 35. – №. 1. – С. 87-93. Doi: 10.1016/S0021-9290(01)00160-9.

4. Fischler M. A., Bolles R. C. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography // Communications of the ACM. – 1981. – Т. 24. – №. 6. – С. 381-395.

Информация об авторах

Романенко Тарас Павлович, техник, Государственный научный центр Российской Федерации «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики» (ГНЦ РФ ЦНИИ РТК), Россия, 194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 21, t.romanenko@rtc.ru

Варлашин Виктор Витальевич, к.т.н., начальник лаборатории, ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Россия, 194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 21, v.varlashin@rtc.ru

Заруцкий Николай Владимирович, начальник отдела, ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Россия, 194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 21, zarutskiy@rtc.ru

Автономные орбитальные роботизированные станции для сбора космического мусора на основе технологий искусственного интеллекта

Е.С. Квас, А.А.В. Мельницкая✉, В.В. Назаренко, М.В. Бутусов, А.В. Степанов, А.В. Рысин
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» (ФГАОУ ВО ГУАП), Санкт-Петербург, Россия, tigerbrine@mail.ru

Аннотация
Разработан алгоритм и предложен подход к созданию автономной роботизированной станции для сбора мусора на Земной орбите. Предложенный подход учитывает возможные риски и может быть не только рассмотрен как элемент политики безопасности, но и реализован в рамках процедур повышения достоверности оценки защищенности используемых космических объектов. Целью работы является разработка алгоритма для автономной станции. В рамках исследования построена симуляционная модель, которая позволяет оценить влияние различных сценариев на продуктивность системы. Данная модель предоставляет возможность прогнозирования поведения системы и принятия обоснованных решений по уменьшению количества мусора на орбите. Рассмотрены особенности и перспективы использования автономной станции.

Ключевые слова
Трёхмерная форма объекта, точные размеры, скорость и ось вращения, орбитальные параметры, косвенные данные о материале объекта, скорость относительно сенсора (доплеровский сдвиг), оценка точности измерений и влияние шума; алгоритм LSTM, входной гейт, забывающий гейт, выходной гейт, подход Deep SARSA, Манёвр Хохмана, фильтр Калмана, мониторинг траектории.

Autonomous orbital robotic space debris collection stations based on artificial intelligence technologies

Evgeny S. Kvas, Anna-Alexandra V. Melnitskaya✉, Valery V. Nazarenko, Mikhail V. Butusov, Alexander V. Stepanov, Alexander V. Rysin
SUAI, St. Petersburg, Russia, tigerbrine@mail.ru

Abstract
An algorithm has been developed and an approach has been proposed for creating an autonomous robotic station for collecting debris in Earth orbit. The proposed observation approach provides the ability to observe and can be not only an observation as an element of security policy, but also implemented within the procedure for measuring the accuracy of observation of the protection of external visibility of objects. The purpose of the work is to develop an algorithm for an autonomous station. As part of the study, a simulation model has been built that allows assessing the impact of various manifestations on the productivity system. This model provides the ability to predict the behavior of the system and make informed decisions to reduce the amount of debris in orbit. The features and prospects for using an autonomous station are considered.

Key words
Three-dimensional shape of the object, precise dimensions; speed and axis of rotation; orbital parameters, indirect data on the object material, speed relative to the sensor (Doppler shift), assessment of measurement accuracy and the influence of noise, LSTM algorithm, input gate, forgetful gate, output gate, Deep SARSA approach, Hohman maneuver, Kalman filter, trajectory monitoring.

Введение

В 1999 году Комитет по мирному использованию космического пространства (COPUOS) опубликовал «Технический отчет о космическом мусоре», с тех пор проблема загрязнения околоземной орбиты становится все более значимой. Космический мусор представляет опасность для космических аппаратов на орбите Земли и, в случае если он не сгорит при входе в атмосферу, он может представлять угрозу для объектов, находящихся на поверхности Земли. Постоянное увеличение количества мусора приводит к возрастанию вероятности столкновения и нанесения ущерба космическим аппаратам. Как правило, космическим мусором являются либо фрагменты, возникающие из-за разрушения частей используемых аппаратов, либо обломки, отделившиеся во время запуска ракет-носителей.

Иными словами, существует непосредственная необходимость в решении сложившейся проблемы. Поиском различных путей решений, а также созданием алгоритмов нахождения и распознавания траекторий движения космического мусора занимаются различные организации. Мы хотим предложить свой способ, на наш взгляд являющийся оптимальным в данных условиях.

Технические аспекты создания автономной космической станции по сбору мусора

В условиях нарастающей проблемы космического мусора создание высокоэффективной роботизированной станции, способной к его сбору, становится критически важным. Для достижения этой цели необходимо интегрировать передовые технологии в разнообразные компоненты устройства. Это включает в себя манипуляторы, которые должны эффективно захватывать объекты различной формы и размера, систему зрения, обеспечивающую точное определение местоположения мусора и датчики, которые играют ключевую роль в обнаружении и отслеживании объектов. Кроме того, имеющиеся двигатели должны гарантировать маневренность и мощность, чтобы станция могла эффективно работать в сложных условиях космоса. Далее мы подробно рассмотрим все эти аспекты оборудования, подчеркивая их важность для успешного выполнения миссий по очистке орбиты от космического мусора.

Роботизированные руки представляют собой сложные манипуляторы, которые играют ключевую роль в сборе космического мусора. Эти устройства могут иметь несколько степеней свободы, что позволяет им выполнять широкий спектр движений и манипуляций, а благодаря своей точности, они способны захватывать объекты различной формы и размера. Также они могут быть оснащены различными захватами и инструментами, что делает их универсальными для работы в условиях невесомости. Эти манипуляторы позволяют эффективно работать с мелкими и хрупкими объектами, минимизируя риск их повреждения. Кроме того, они будут интегрироваться с системами зрения и сенсорами, обеспечивая точное определение местоположения и ориентации мусора.

Мы ориентируемся на существующий пример манипулятора такого типа - робот DEXTRE, который является частью мобильной обслуживающей системы «Канадам 2» на МКС. Он имеет две механические руки, которые имеют семь степеней свободы, что дает высокую точность манипуляций. Каждая рука имеет монохромную камеру и цветную с подсветкой, что дает полный контроль над действиями робота. Такая система позволяет выполнять высокоточный захват мусора в открытом космосе.

Континуумные роботы — это гибкие манипуляторы, которые не имеют жестких суставов и состоят из сегментов, способных изгибаться и перемещаться в любом направлении. Они используют различные принципы управления, включая сервоуправление и обратную связь от сенсоров, что позволяет им адаптироваться к различным формам и задачам. Эти роботы идеально подходят для сбора космического мусора, так как могут захватывать объекты разных размеров и форм без риска повреждений. Такой тип манипулятора уже применялся для сбора мусора, хотя считается новым и не полностью изученным. Он показал высокую эффективность в условиях космоса и в нашей работе он необходим для более аккуратного сбора предметов в условиях отсутствия гравитации.

Предполагается, что первый тип будет задействован для больших объектов, для сбора которых нужна в первую очередь сила и не нужна сохранность. Второй тип будет применяется для сбора тех предметов, которые необходимо сохранить в том виде, в котором они находились изначально.

Роботизированной станции необходимы камеры для разных задач: обнаружение объектов, распознание, оценка расстояния, создание карт, мониторинг состояния, сбор данных и для навигации. Не существует устройств, которые могут выполнять все эти задачи одновременно, поэтому нужно использовать набор различных камер. Мы можем использовать RGB камеру, поскольку она может получать изображение в высоком качестве на свету, инфракрасную камеру, потому что такие камеры используются в условиях недостаточной видимости, эффективны в мониторинге и обнаружении перегрева, подходят для оценки космических объектов. Однако у них меньшая детализация в сравнении с RGB камерами и их данные сложны в обработке. Также возможно использование стереокамер, потому что они имеют высокую точность в определении расстояния до объекта и дают возможность получать пространственную информацию, однако они требуют больших вычислительных мощностей и сложны в калибровке.

Аналогично камерам станции нужен определенный набор датчиков, которые необходимы для правильного функционирования и для возможности выполнять нужные нам задачи. Мы предлагаем использовать технологию «LiDAR», которая использует оптический метод дистанционного зондирования, посылая лазерные импульсы для определения расстояния до объектов и радар. В паре со стереокамерами датчики позволяют составлять более точные 3Д карты объектов и окружающей среды, что позволяет идентифицировать предметы и получать данные в режиме реального времени в высоком разрешении. Однако лидары очень чувствительны к условиям окружающей среды, что накладывает некоторые ограничения. Поэтому, будет правильным решение использование ультразвуковых датчиков, которые вместе с лидаром и стереокамерами позволят получать данные о расстоянии вблизи объектов и не будут сильно зависеть от условий окружающей среды. И, конечно же, станция нуждается в гироскопах и акселерометрах, которые будут измерять угловую скорость, помогать в навигации по трем осям, измерять линейную скорость. Они будут нужны для навигации и стабилизации роботизированной станции, для определения положения относительно Земли.

Для автономной космической роботизированной станции наилучшими вариантами солнечных батарей являются те, которые обладают высокой эффективностью, легким весом и возможностью адаптации к различным условиям. На текущий момент выделяются следующие типы солнечных батарей:

1. Инвертированные метаморфные многоступенчатые солнечные элементы (IMM). Эти элементы, используемые в проектах NASA, обеспечивают эффективность до 40% и имеют меньшую массу по сравнению с обычными многоступенчатыми солнечными батареями, что положительно влияет на динамику роботизированной станции. Они подходят для космических аппаратов из-за высокой мощности и легкости. Несмотря на то, что эти элементы обеспечивают высокую эффективность, они могут быть слишком чувствительными к условиям эксплуатации, например к радиации в космосе. Это может снизить их долговечность по сравнению с другими типами солнечных батарей.

2. DragonSCALES от mPower: Эти солнечные модули - новая технология, которая обещает быть более дешевой, гибкой и легкой, чем традиционные солнечные элементы на основе галлия-арсенида. DragonSCALES разрабатываются для использования на спутниках и других космических аппаратах и могут производить до 1,1 МВт электроэнергии для космических массивов. Поскольку это новая технология, у неё может быть ограниченная опытная база по сравнению с более традиционными солнечными элементами. Это может создавать риски, связанные с их производительностью и надежностью в долгосрочной перспективе.

Алгоритмы приоритезации космического мусора и построения маршрутов с использованием машинного обучения и обучения с подкреплением.

Для принятия обоснованных решений о захвате космического мусора в систему роботизированной станции уже загружена карта, содержащая актуальные данные о расположении объектов мусора. Эта карта предоставляет необходимую информацию о координатах, скорости и орбитальных параметрах каждого объекта. В определенные моменты времени станция с помощью датчиков может определить свое местоположение в пространстве, что дает ей возможность выбирать приоритетные цели для захвата. Для оптимизации этого процесса мы предлагаем использовать подход Deep Q-Network (DQN). DQN — это алгоритм обучения с подкреплением, который сочетает в себе методы Q-обучения и нейронные сети. Основная цель DQN заключается в обучении роботизированной станции оптимальной стратегии, которая максимизирует ожидаемую награду на основе его действий и состояний. Обучение этой модели, как и всех последующих, происходит в специализированном программном обеспечении, где используются те же данные о космическом мусоре и его характеристиках, полученные с помощью карты мусора. Обучение DQN происходит через взаимодействие агента (объекта обучения) с окружающей средой, где агент получает награды за правильный выбор целей. Важно отметить, что с помощью заранее обученной модели станция способна быстро адаптироваться к новым условиям, что значительно повышает его эффективность в процессе захвата мусора в космосе.

После выбора оптимального объекта космического мусора, роботизированная станция переходит в точку, где возможно установить оптическое наблюдение за выбранным объектом. Этот шаг критически важен для уточнения имеющихся данных о мусоре, таких как его размеры, форма и текущее состояние. Определение космических объектов ведется с использованием интерферометрической радиолокационной съёмки с обратной синтезированной апертурой (ISAR) и интерферометрической синтезированной апертурой (InSAR), которая представляет собой сочетание методов для высокоточного обнаружения и картирования объектов в космосе.

Главное преимущество ISAR заключается в его способности работать в любых погодных условиях и независимо от освещенности [1]. Это особенно полезно для мониторинга космических объектов и спутников, когда требуется высокая детализация и точность, например, для оценки состояния спутника или для наблюдения за некооперативными целями в космосе. Технология ISAR помогает обнаруживать и классифицировать космические объекты по их структурным особенностям и траекториям движения.

Для успешного применения ISAR важен выбор времени съёмки, при котором достигается наилучшее качество изображения. Это требует учёта таких параметров, как Доплеровское расширение и максимальная проекция объекта на радиолокационную плоскость. Современные алгоритмы и оборудование, например, программируемые вентильные матрицы (FPGA), позволяют обрабатывать данные в реальном времени [2], что ускоряет получение изображений и улучшает их качество, также скорость работы аппаратуры позволяет получать результат в реальном времени, что позволит использовать данные для поиска космического мусора.

Теперь рассмотрим алгоритмы построения оптимальных маршрутов. Космический мусор движется по орбитам, и его положение может изменяться со временем в зависимости от множества факторов, таких как гравитационные силы, атмосферные возмущения, солнечное давление и взаимодействие с другими объектами. Эти движения могут быть сложными для моделирования из-за наличия шумов и слабых возмущающих сил. Поэтому нужно использовать алгоритмы машинного обучения, которые смогут сравнивать теоретическое и реальное положение мусора в космосе [3].

Наиболее подходящим решением является алгоритм LSTM (Долгая краткосрочная память), который обрабатывает элементы временного ряда, обновляя свою память на каждом шаге, что позволяет сохранять информацию о зависимости между предыдущими шагами и текущими состояниями.

Для выполнения алгоритма используем следующие формулы и определения:

Ячейка памяти - основная память, которая хранит информацию на протяжении времени. (Обозначается как C_t)

$i_t=\sigma(W_i \cdot [h_{t-1}, x_t]+b_i)$ – входной гейт (определяет, какую информацию из входного вектора xt следует сохранить в ячейку памяти)

$f_t=\sigma(W_f \cdot [h_{t-1}, x_t]+b_f)$ – забывающий гейт (определяет, какую информацию из предыдущего состояния Ct-1 следует забыть)

$o_t=\sigma(W_o \cdot [h_{t-1}, x_t]+b_o)$ – выходной гейт (определяет, какую информацию из ячейки памяти следует выводить)

$C_t = f_t \cdot C_{t-1} + i_t \cdot tanh\ (W_C \cdot [h_{t-1}, x_t]+b_C)$ – обновление ячейки памяти

Где: W_i, W_f, W_o, W_C — веса входов; b_i, b_f, b_o, b_C — смещения; σ — сигмоидная функция; *tanh* — гиперболический тангенс; h_t - вектор состояния [4].

Если отклонения от прогнозируемой траектории становятся значительными (десятки или сотни метров), роботизированная станция может использовать сенсоры для корректировки курса на основе новых наблюдений и предсказаний от LSTM. Важно периодически проверять отклонения от изначальной траектории, чтобы не тратить топливо на ненужные маневры.

Для построения и преодоления оптимального маршрута к мусору мы будем использовать подход, под названием Deep SARSA [5], который сочетает в себе принципы классического SARSA [6] с мощью глубоких нейронных сетей (DNN) [7] и манёвр Хохмана — эффективный метод перехода между орбитами, минимизирующий расход топлива [8].

SARSA (State-Action-Reward-State-Action) — это алгоритм обучения с подкреплением (RL), который позволяет агенту (объекту обучения) обучаться, используя его фактические действия и полученные вознаграждения. SARSA является алгоритмом on-policy, что означает, что агент обновляет свою стратегию на основе фактически выполняемых действий, а не гипотетически оптимальных [9].

$$Q(S, A) = Q(S, A) + \alpha (R + \gamma Q(S', A') - Q(S, A))$$

где Q (S, A) — оценка действия в состоянии S, которую обновляет нейронная сеть; α — это скорость обучения; γ — коэффициент дисконтирования, учитывающий будущие вознаграждения; S – это описание текущей ситуации, в которой находится роботизированная станция; A – это действие, которое агент может выполнить в определённый момент времени, например, изменение скорости, поворот, или переход на другую орбиту с помощью манёвра Хохмана; R – вознаграждение, которое агент получает после каждого выполнения действия; S' - новое состояние, в которое агент переходит после выполнения действия для принятия следующего решения.

Так как пространство состояний на орбите огромно (размеры орбит, скорости, параметры мусора и роботизированной станции), табличное представление всех возможных состояний и действий неэффективно. Чтобы решить эту проблему, используем глубокую нейронную сеть для аппроксимации функции Q (S, A). Это позволит агенту принимать решения в сложной среде на основе данных, которые он обучается обрабатывать в процессе выполнения миссий [11].

Описание DNN:

1. Входной слой: принимает параметры состояния S. Это те характеристики, которые мы получили при обработке и подготовке данных.

Количество нейронов (вычисляют взвешенную сумму входов с учётом порога активации и передаёт выходной сигнал в следующий слой сети при помощи формулы $z = \sum_{i=1}^{n} w_i x_i + b$, где x1, x2, ..., xn — это входы, w1, w2, ..., wn — соответствующие веса, а b — порог активации (bias)) равно числу параметров состояния.

2. Скрытые слои: в них происходит вычисление сложных нелинейных зависимостей между входными параметрами.

В нашем случае будет использовано 3 слоя: где первый слой содержит 128 нейронов, второй — 64, и третий — 32. Используется функция ReLU - Rectified Linear Unit, в качестве функции активации, чтобы нейросеть могла обучаться нелинейным зависимостям между состояниями и действиями [12].

3. Выходной слой: генерирует предсказания ценности Q (S, A) для всех возможных действий агента в текущем состоянии. Количество нейронов соответствует числу возможных действий. В нашем случае это 4 действия: ускорение, замедление, изменение направления, манёвр Хохмана [13].

Манёвр Хохмана — это метод, который позволяет эффективно переходить с одной круговой орбиты на другую с минимальными затратами топлива.

Принцип работы манёвра Хохмана: роботизированная станция на своей круговой орбите применяет первый импульс для перехода на эллиптическую орбиту, которая пересекается с орбитой мусора. Затем она движется по эллиптической орбите, постепенно приближаясь к цели и когда достигает точки сближения с мусором, применяет второй импульс, чтобы перейти на круговую орбиту мусора и продолжить сближение.

Формулы для расчёта манёвра Хохмана [14]:

Изменение скорости (Δv) при переходе с одной орбиты на другую:

$$\Delta v1 = \sqrt{\frac{\mu}{r1}}\left(\sqrt{\frac{2r2}{r1+r2}} - 1\right)$$

для перехода с низкой орбиты на эллиптическую орбиту и

$$\Delta v2 = \sqrt{\frac{\mu}{r2}}\left(1 - \sqrt{\frac{2r1}{r1+r2}}\right)$$ для завершения перехода на целевую орбиту,

где μ - гравитационный параметр (для Земли $\mu \approx 3.986 * 10^5 к\frac{м^3}{с^2}$), r1 и r2 - радиусы начальной и конечной орбит.

Время, за которое роботизированная станция переместится по эллиптической орбите до точки выхода на целевую орбиту:

$$t = \frac{\pi\sqrt{(r1+r2)^3}}{2\sqrt{2\mu}}.$$

Для учета динамических препятствий, мы добавим дополнительный алгоритм для работы с динамическими препятствиями, не изменяя основной алгоритм подлета и захвата мусора. Эти элементы будут интегрироваться в текущий процесс выполнения задачи, помогая роботизированной станции избегать столкновений с движущимися объектами.

Основная задача — предсказать возможные столкновения с препятствиями (например, с другим космическим мусором) на траектории роботизированной станции и своевременно корректировать маршрут, чтобы их избежать. Мы используем радар и LiDAR для получения данных об окружающих объектах и фильтр Калмана [15] для предсказания положения и траектории препятствий, а также перпендикулярное отклонение для уклонения от препятствия.

Подробно рассмотрим использование фильтра Калмана. Для каждого объекта состояние может быть описано как:

$$x(t) = \left(x(t)y(t)z(t)v_x(t)v_y(t)v_z(t)\right)$$

где *x, y, z* — текущее положение, v_x, v_y, v_z — текущие скорости объекта.

Формула для предсказания изменения положения объектов со временем. Например, модель с постоянной скоростью:

$$x(t+1) = F_x(t) + w(t),$$

где F — матрица перехода состояния, а w(t) — шум процесса.

На каждом временном шаге (каждый шаг обновления данных сенсоров) фильтр Калмана предсказывает будущее положение объектов, используя текущие измерения: $\hat{x}(t+1) = F\hat{x}(t)$. Одновременно обновляется ковариационная матрица ошибок:

$$P(t+1) = FP(t)F^T + Q$$

и предсказания по новым данным:

$$\hat{x}(t) = \hat{x}(t|t-1) + K(t)\big(z(t) - H\hat{x}(t \vee t-1)\big),$$

где K(t)— коэффициент Калмана, z(t)— измеренные значения, H — матрица измерений.

После расчета траектории препятствия мы рассчитываем точки ближайшего подхода — это ключевой момент, поскольку он определяет, когда будет выполняться маневр [15].

Математически, точка ближайшего подхода d_{min} может быть найдена как минимум расстояния между двумя векторами движения роботизированной станции и препятствия:

$$d_{min} = min_t \vee r_{\text{станции}}(t) - r_{\text{препятствия}}(t) \vee,$$

где $r_{\text{станции}}(t) и r_{\text{препятствия}}(t)$ — позиции станции и препятствия соответственно в зависимости от времени.

Маневр будет происходить в направлении, перпендикулярном к относительной траектории препятствия:

$$v_{\text{перп}} = v_{\text{отн}} * \hat{n},$$

где $\hat{n}$- единичный вектор, перпендикулярный к плоскости движения.

Изменение траектории роботизированной станции: роботизированная станция должна скорректировать свою скорость в этом перпендикулярном направлении. Для этого она использует свои двигатели для выполнения маневра, изменяя скорость в перпендикулярном направлении на величину $v_{\text{перп}}$, чтобы временно уйти с траектории пересечения с препятствием.

Мониторинг траектории: после изменения траектории роботизированная станция продолжает отслеживать положение препятствия, чтобы убедиться, что уклонение выполнено успешно. Если препятствие продолжает двигаться в опасной близости, может быть выполнен дополнительный маневр.

Возвращение на исходную траекторию: после безопасного прохождения препятствия роботизированная станция должна вернуться на свою исходную траекторию. Это может быть сделано с помощью обратного маневра, направленного в противоположную сторону от первоначального отклонения, для компенсации изменения траектории.

Теоретическое построение алгоритма самоанализа автономной роботизированной станции

Для создания системы управления роботизированной станцией по сбору мусора нами был разработан специальный алгоритм. В начале каждого цикла действий мы решили внедрить процесс самоанализа систем, проверку на отсутствие внутренних и внешних повреждений или ошибок, способных помешать работе орбитальной станции и превратить её в опасный космический объект. Для решения этой задачи мы представили нашу орбитальную станцию как единый конденсатор, емкость которого нам известна, и запрограммировали прибор, измеряющий емкость станции, подавать сигнал системе движения. В таком случае орбитальная станция выполнит маршрут к месту, с которого астронавты МКС смогут её забрать.

В качестве источника питания космической станции мы выбрали фотоэлектрические панели. Для самоанализа целостности, загрязнённости и работоспособности панелей было предложено внедрить в электрическую цепь вольтметр, который будет считывать напряжение, поступающее с солнечных панелей и сверять его с заданным.

Вторая проблема связана с работой воздушных компрессоров нашей станции. Система движения, алгоритм работы которой был приведён и разработан выше, автоматически составляет самый оптимальный маршрут до мусора и к точке, где сможет попасть на МКС. При условии, что сжатого воздуха останется необходимое количество, станция начнет движение к МКС.

Третья задача системы самопроверки - анализ заполняемости контейнера для сбора мусора. Нами был выдвинут способ решения этой проблемы на основе лазерной сетки, отделяющей 90 процентов контейнера. Когда лазерные лучи прерываются, алгоритм получает сигнал о запылённости контейнера и начинает выполнять алгоритм подлёта к МКС.

Ещё одна проблема, требующая самоанализа — это загрязнённость камер. Она не требует непосредственного вмешательства человека и может быть решена силами автономной орбитальной станции. Для определения степени загрязнённости рассчитывается фокусное расстояние линз, при изменении этого параметра производится попытка очистки линз. В конструкции линз будут предусмотрены так называемые “веки”, способствующие очистке линз от пыли. Если этот способ не вернет фокусное расстояние, программа подаст сигнал на МКС. Если в течение двух циклов орбитальная станция не будет получать данные с МКС, то искусственные интеллект начнет выполнять курс самоуничтожения. Поскольку роботизированная станция будет создан из сгораемых в атмосфере материалов, то орбитальная станция выполнит маневр самоуничтожения в атмосфере.

Заключение

В рамках проведенных исследований и разработок была получена гипотетически возможная автономная роботизированная станция по сбору космического мусора на основе искусственного интеллекта.

Были разработаны алгоритмы самоанализа, постройки маршрута к космическому мусору. Определены важнейшие составляющие станции.

Литература

1. Real-time implementation of inverse synthetic aperture radar imaging using field programmable gate array and digital signal processors, Rui Zhang,Yinghui Quan, Cheng Qian, Lei Yang, Yachao Li, Mengdao Xing URL: https://pubs.aip.org/aip/rsi/article-abstract/89/7/074704/358374/Real-time-implementation-of-inverse-synthetic?redirectedFrom=fulltext.

2. Optimal Space-Borne ISAR Imaging of Space Objects with Co-Maximization of Doppler Spread and Spacecraft Component Area, Rui Gong, Ling Wang, Bin Wu, Gong Zhang, Daiyin Zhu URL: https://www.mdpi.com/2072-4292/16/6/1037.

3. Old perturbative methods for a new problem in Celestial Mechanics: the space debris dynamics URL: https://link.springer.com/article/10.1007/s40574-023-00347-x4. Deep Learning, Ian Goodfellow, Yoshua Bengio, Aaron Courville URL: https://www.deeplearningbook.org/5. LSTM: A Search Space Odyssey, Klaus Greff, Rupesh Kumar Srivastava, Jan Koutník, Bas R. Steunebrink, Jürgen Schmidhuber URL: https://arxiv.org/abs/1503.04069.

4. mmWave Antenna Design in Advanced Fan-Out Technology for 5G Application, Sheng-Chi Hsieh; Fu-Chen. Chu; Cheng-Yu Ho; Chen-Chao Wang URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/8951882.

5. mmWave Antenna Design in Advanced Fan-Out Technology for 5G Application, Sheng-Chi Hsieh; Fu-Chen. Chu; Cheng-Yu Ho; Chen-Chao Wang URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/8951882.

6. Deep Reinforcement Learning with Sarsa and Q-Learning: A Hybrid Approach, Zhi-xiong XU, Lei CAO, Xi-liang CHEN, Chen-xi LI, Yong-liang ZHANG, Jun LAI URL: https://www.jstage.jst.go.jp/article/transinf/E101.D/9/E101.D_2017EDP7278/_article.

7. Optimal Trajectories For Space Navigation, D. F. Lawden URL: https://www.cambridge.org/core/journals/mathematical-gazette/article/abs/optimal-trajectories-for-space-navigation-by-d-f-lawden-pp-viii-126-21s-net-1963-butterworth-and-co/86F0D157D3B7505B1B176E9799D1739A#access-block.

8. Deep Reinforcement Learning: An Overview, Yuxi Li, URL: https://arxiv.org/abs/1701.07274.

9. Deep Reinforcement Learning: An Overview, Yuxi Li, URL: https://arxiv.org/abs/1701.07274.

10. Deep Learning using Rectified Linear Units (ReLU), Abien Fred Agarap, URL: https://arxiv.org/abs/1803.08375.
11. Reinforcement Learning: An Introduction, Richard S. Sutton, Andrew G. Barto URL: http://incompleteideas.net/book/the-book-2nd.html.
12. A New Approach to Impulsive Rendezvous near Circular Orbit, Thomas Carter, Mayer Humi URL: https://arxiv.org/abs/1211.3081.
13. Introduction to random signals and applied Kalman filtering, R.G.Brown, P.Y.C. Hwang URL: https://www.academia.edu/35980412/kupdf_com_brown_rg_hwang_pyc_introduction_to_random_signals_and_applied_kalman_filtering_with_matlab_exercises_wiley_2012_pdf.
14. Collision-avoidance for mobile robots using region of certainty: A predictive approach, B. Manup, P. Raja URL: https://www.researchgate.net/publication/291287675_Collision-avoidance_for_mobile_robots_using_region_of_certainty_A_predictive_approach.

Информация об авторах

Квас Евгений Станиславович, старший преподаватель, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения», ФГАОУ ВО ГУАП, Россия, 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А, e.kvas@guap.ru, ORCID: 0000-0001-5164-8454

Мельницкая Анна-Александра Валерьевна, студент, ФГАО ВО ГУАП, Россия, 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А, tigerbrine@mail.ru

Назаренко Валерий Валерьевич, студент, ФГАО ВО ГУАП, Россия, 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А, Valera20052@gmail.com

Бутусов Михаил Владимирович, студент, ФГАО ВО ГУАП, Россия, 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А, mihael.butusov@yandex.ru

Степанов Александр Васильевич, студент, ФГАО ВО ГУАП, Россия, 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А, breykord@gmail.com

Рысин Александр Владимирович, заместитель директора Инженерной школы, Старший преподаватель кафедры электромеханики и робототехники, зав. лаб. робототехники, ФГАОУ ВО ГУАП, Россия, 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А, galewon@yandex.ru, ORCID: 0000-0003-0968-320X

Многопользовательская игровая платформа для формирования интереса у молодежи к робототехнике

А.Н. Богданов✉, Д.И. Шайхезадин, Н.С. Шаронов
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет» (ФГБОУ ВО «КГЭУ»), г. Казань, Республика Татарстан, Российская Федерация, ban.mic@mail.ru

Аннотация
В 2024 году спортивные секции остаются лидерами среди кружков, но интерес к техническим и языковым направлениям также не утихает. В то же время, количество молодых людей, увлеченных видеоиграми, продолжает расти. В ответ на этот тренд наша команда разработала уникальную платформу, которая позволяет управлять настоящими роботами через интернет, участвуя в увлекательных соревнованиях — от робо-футбола до робо-сумо. Теперь каждый может стать участником международных турниров, не покидая своего дома. Платформа предлагает систему баллов, которые можно использовать для улучшения роботов и открытия новых возможностей, как в любимых онлайн-играх. Соревновательный полигон, видеотрансляции в реальном времени и интуитивно понятный интерфейс позволяют погрузиться в мир робототехники, не выходя из школьного кабинета или дома. Этот проект не только дает возможность соревноваться, но и получать знания о программировании, конструировании и 3D-моделировании.

Ключевые слова
Спортивные секции, технические кружки, видеоигры, робототехника, дистанционное управление, онлайн соревнования, робо-футбол, робо-сумо, программирование роботов, международные турниры.

A multi-user gaming platform for generating interest among young people in robotics

Alexander N. Bogdanov✉, Damir I. Shaykhezadin, Nikita S. Sharonov
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kazan State Power Engineering University» (KSPEU), Kazan, Republic of Tatarstan, Russia, ban.mic@mail.ru

Abstract
In 2024, sports clubs remain the leaders among extracurricular activities, but interest in technical and language-oriented clubs is also growing. At the same time, the number of young people passionate about video games continues to rise. In response to this trend, our team has developed a unique platform that allows users to control real robots online and participate in exciting competitions, from robo-football to robo-sumo. Now, anyone can join international tournaments without leaving their home. The platform offers a points system that can be used to improve robots and unlock new features, just like in popular online games. The competitive arena, real-time video streaming, and intuitive interface allow users to immerse themselves in the world of robotics from the comfort of their school or home. This project not only provides an opportunity to compete but also offers knowledge in programming, construction, and 3D modeling.

Key words
Sports clubs, technical clubs, video games, robotics, remote control, online competitions, robo-football, robo-sumo, robot programming, international tournaments.

Согласно результатам исследования платформы профориентации "Профилум", самые популярные в 2024 году кружки – спортивные секции, их посещают 71% детей опрошенных родителей. Далее по популярности следуют языковые и технические кружки – 38,5 и 33% соответственно [1]. Эти данные подчеркивают растущий интерес к активным формам обучения и занятием, которые развивают как физические, так и интеллектуальные способности. Также стоит отметить, что тенденция увеличения популярности спортивных кружков может быть связана с повышением внимания к здоровью и физической активности среди молодежи, что в свою очередь может повысить заинтересованность в робототехнике и инженерии как способах развить технологические навыки для решения реальных задач.

В то же время, по данным ВЦИОМ, количество молодых людей 18-24 лет, играющих в видеоигры, увеличилось от 40% в 2019 году до 56% в 2022 году, и продолжает расти [2]. Эта динамика также свидетельствует о возрастающем интересе к интерактивным и игровым форматам, в которых технологии и образование могут тесно переплетаться, создавая инновационные возможности для обучения и творчества.

Интерес к новым форматам обучения, включая робототехнику и игровое программирование, можно объяснить с точки зрения теории социального научения. Согласно этой теории, обучающиеся лучше воспринимают

информацию, если они активно вовлечены в процесс взаимодействия с предметом. Наша платформа интегрирует элементы как формального, так и неформального образования, используя методики геймификации и интерактивного обучения [3]. Это сочетание способствует эффективной передаче знаний, активизирует познавательные процессы, а также усиливает мотивацию обучающихся за счет элементов соревнований и наград, как это описано в трудах Бандуры (1977) о мотивационном влиянии соревнования на обучающуюся молодежь. Таким образом, геймифицированные подходы, использованные в нашей платформе, позволяют расширить возможности образования и предоставляют новый способ освоения STEM-навыков в безопасной и мотивирующей среде.

Нашей командой разрабатывается платформа, позволяющая управлять настоящими роботами дистанционно через интернет и проводить соревнования в игровом формате с различными испытаниями – робо-футбол, робо-сумо, робо-квесты и др. При этом участвовать в таких соревнованиях можно прямо из дома или школы. А набираемые баллы можно использовать на открытие различных улучшений и доступа к новым возможностям, как и в обычных многопользовательских онлайн-играх [4].

Разрабатываемая платформа (см. рис. 1) включает:

– соревновательный полигон;
– серверная система, обеспечивающая дистанционное управление роботами через интернет, видеотрансляцию в режиме реального времени и взаимодействие игроков и роботов;
– роботы на дистанционном управлении через интернет;
– сайт личного кабинета игрока с элементами игрофикации;
– пользовательский интерфейс в виде сайта управления роботом.

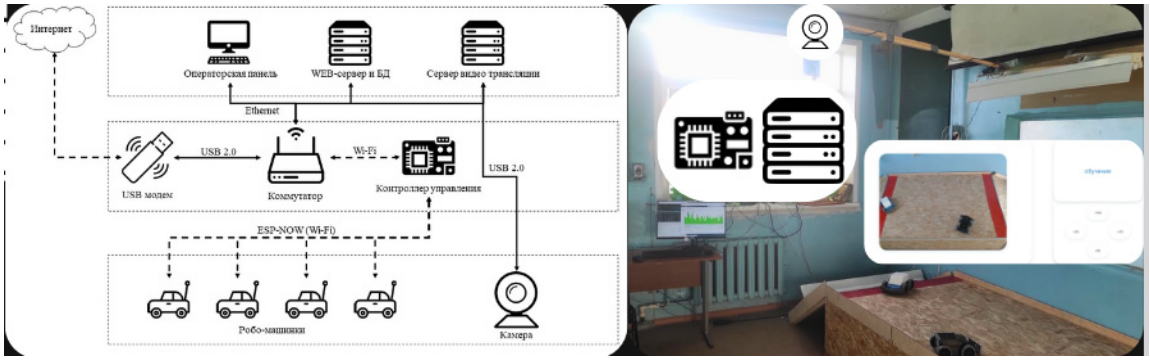


Рисунок 1 — Прототип одной из версий платформы

Весной 2024 мы провели первую сезонную серию, состоящую из более чем 20 онлайн-турниров, и собрали более 200 отзывов игроков (см. рис. 2). В ходе данных турниров игроки набирали баллы, которые могли потратить на выбор робота и использование навесного модуля – тарана.

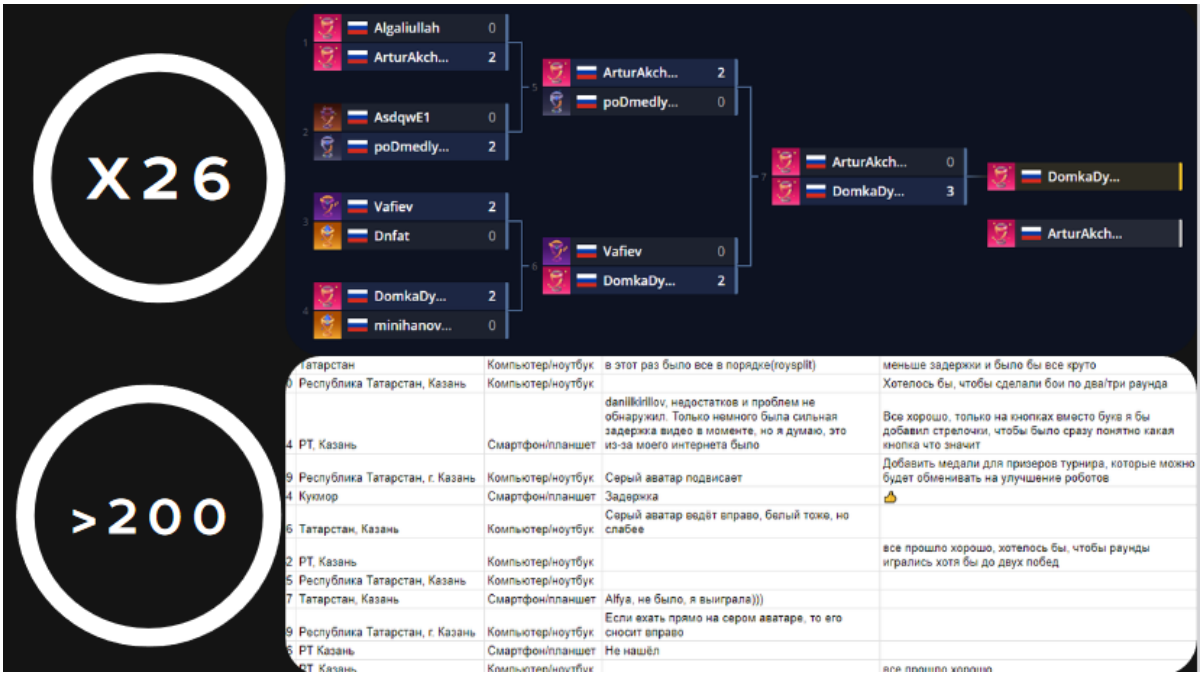


Рисунок 2 — Турнирная таблица и обратная связь

В результате прошедшего в ходе весеннего сезона опытного тестирования разрабатываемой системы определены 2 основных на данном этапе недостатка – временами возникающие задержки видеотрансляции и необходимость в администраторе-организаторе турнира (запуск, расстановка, замена, распределение роботов между игроками и т.п.). Задержки видеотрансляции большей частью вызваны использованием мобильного интернета. А необходимость в администраторе можно уменьшить путем автоматизации отдельных функций.

Данную платформу можно использовать в качестве инструментария формирования первичного интереса к робототехнике как в соревновательном, так и в игровом форматах.

В соревновательном формате платформа позволяет проводить турниры с дистанционным участием. Ежегодно проводится более 10 соревнований по робототехнике различного уровня [5]:

- Балтийский научно-инженерный конкурс;
- ВРО (национальный отборочный тур на WRO, но со своими особенностями);
- ДЕТалька;
- ИКаР и ИКаРенок;
- Кубок РТК;
- Олимпиада НТИ;
- Робофинист;
- Турнир двух столиц;
- BRD FIRST Tech Challenge Romania (Румыния);
- EUROBOT;
- EuroSkills;
- FIRST ChinaInternational (КНР);
- FIRST WorldChampionship (США);
- IYRC (Корея);
- JuniorSkills;
- MATE (Австралия);
- PROFEST (бывшийРобофест);
- Robocom (КНР);
- ROBOCON (Япония);
- RoboCup;
- RobotChallenge (КНР);
- Robotex (Эстония);
- Singapore AUV Challenge (Сингапур);
- VEX Robotics World Championship (США);
- WorldSkillsJuniors;
- WRO.

Но участие в подобных соревнованиях требует значительных финансовых расходов, отрыва от учебного процесса, что является серьезным барьером для развития соревновательного движения по робототехнике в России.

Дистанционный формат позволяет решить ряд проблем сократив расходы и повысив доступность. С помощью данной платформы участники могут управлять прямо из дома или учебного учреждения реальным физическим устройством, находящимся на общем полигоне. Подобный подход был протестирован в декабре 2023 года, когда учащиеся из двух школ, находящихся в Казани и в пригороде, соревновались между собой (см. рис. 3). В настоящее время используются наземные мобильные роботы, но в дальнейшем в качестве управляемого устройства может использоваться как стационарный робот-манипулятор, так и летающий/плавающий аппарат.

Рисунок 3 — Турнир с участием учащихся двух школ

С развитием платформы участники смогут не только соревноваться в управлении роботом, но и в программировании робота на выполнение различных функций в автоматическом режиме – автопилотирование, перемещение и сортировка грузов и т.п. Для этого участник через интернет загружает программу в робота, находящегося на полигоне, и может в онлайн-режиме увидеть, как настоящий робот выполняет заложенные функции в реальном физическом мире.

Такой формат позволит проводить соревнования на регулярной основе без необходимости отрывать учащихся от учебного процесса, перевозить их в другой конец страны, организовывать их размещение. Данное решение значительно повышает доступность соревнований по робототехнике и сокращает расходы на их организацию. Но соревнования по робототехнике – это не только соревнования программистов, но и конструкторов и междисциплинарных команд. И в таких соревнованиях платформу также можно использовать. Например, участники могут разработать и прислать 3D-модели корпуса робота и потом управлять роботами, изготовленными по их проектам. Или прислать самого робота. В случае размещения подобных арен, подключенных к данной платформе, в различных городах России – повысится возможность использования в таких соревнованиях готовых роботов от различных разработчиков.

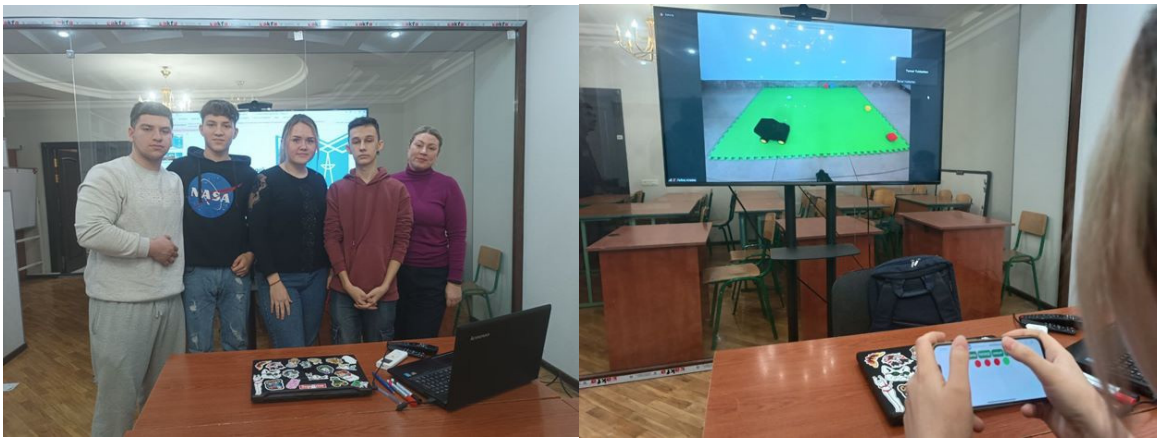


Рисунок 4 — Онлайн-робоквест

Также данная платформа может быть использована в международных соревнованиях. Элементы данного подхода были апробированы нами в феврале 2023 г. Учащиеся, находящиеся на территории представительства Россотрудничества в Узбекистане, управляли мобильными автоматизированными платформами, находящимися в Казанском государственном энергетическом университете (см. рис. 4).

Для реализации игрового формата важным является вопрос круглосуточной доступности системы. Осенью 2024 года нами запущена игра с круглосуточным доступом – Полигон 4 (Демо) с целью тестирования технических решений, автоматизирующих ряд процессов. В данном формате игрок, управляя роботом через интернет, должен за ограниченный период времени провести его через полигон с эстокадами и «минами», сигнализирующими при столкновении (см. рис. 5). Каждая мина представляет собой 3D-печатную конструкцию, внутри которой установлен датчик вибрации. При контакте робота с миной датчик вибрации срабатывает, фиксируя событие столкновения. Датчики вибрации соединены проводами с локальным микроконтроллером, который собирает данные с каждого датчика, обрабатывает их и отправляет сигнал на главный микроконтроллер системы.

Главный микроконтроллер, в свою очередь, записывает информацию о каждом срабатывании мины в игровую базу данных, привязанную к текущей сессии игры. Это позволяет точно фиксировать все инциденты в режиме реального времени, что становится основой для подсчета очков и формирования статистики игрока. Перед началом новой сессии игровая база данных обновляется, чтобы каждый игрок начинал с «чистого листа» и мог получить объективные оценки своего игрового прогресса.

Чем быстрее игрок проведет робота и с меньшим столкновением с минами – тем больше он получит ООО (очки опыта оператора). В дальнейшем ООО игроки смогут потратить на улучшение управляемости роботом, включение бортовой камеры, кастомизацию робота и другие возможности.

В данном формате роль администратора заключается лишь в установке робота на зарядную станцию, что в последующем также можно будет автоматизировать. В ходе прохождения испытания на полигоне находится лишь один рабочий робот. В случае, если аккумуляторы робота близки к разрядке, система переключает управление на резервного робота, находящегося на левой приставной площадке. Администратор, получив сигнал о разрядке аккумуляторов робота, дистанционно управляя выводит его на правую приставную площадку. И когда появляется возможность – ставит этого робота на зарядку.

В данной версии автоматизированы процессы получения игроком доступа к управлению роботом, учет задевания «мин» и набор баллов, переключение между режимами в зависимости от местоположения рабочего робота.

Для обеспечения стабильности и бесперебойной работы, система игры «Полигон 4 (Демо)» снабжена источником бесперебойного питания (ИБП), позволяющим поддерживать функционирование всех компонентов даже в случае кратковременного отключения электроэнергии. Это решение особенно важно, так как круглосуточный доступ к Полигону требует высокого уровня надёжности и позволяет избежать сбоев в работе при внешних неполадках электросети. Вся система на данный момент подключена к интернету через мобильный

модем с антенной-усилителем MiMo, что улучшает сигнал в условиях нестабильного покрытия. Однако в будущем планируется переход на проводной интернет для повышения скорости и стабильности соединения, что минимизирует задержки и сделает управление роботом ещё более плавным и точным.

Рисунок 5 — Полигон 4 (Демо)

В дальнейшем планируется расширить образовательный и игровой контент, реализовать сетевую модель, состоящую из множества полигонов, размещенных в кружках робототехники с различными форматами онлайн-соревнований и единой игровой (с медалями и достижениями, виртуальным прогрессом, ивентами и др.) и обучающей системой (3D-моделирование и 3D-печать, программирование и конструирование и др.). Более подробная информация о данном проекте размещается в группе https://vk.com/robo_football.

Литература

1. Рамблер/женский: [сайт] / Россияне рассказали, какие кружки выбирают для детей – Обновляется в течение суток. – URL: https://woman.rambler.ru/ (дата обращения: 27.08.2024). – Текст: электронный.
2. Успешность совместного решения игровых компьютерных задач учащимися подросткового и юношеского возраста: вклад социального интеллекта / Е.В. Гаврилова, Е.А. Шепелева, Е.А. Валуева, М.Р. Хуснутдинова // Психологическая наука и образование. 2023. Том 28. № 4. С. 20–31. DOI: 10.17759/pse.2023000003
3. Карсункин, О. И. Геймификация как эффективный метод интерактивного обучения / О. И. Карсункин, А. М. Булынин // Информация и образование: границы коммуникаций. – 2024. – № 16(24). – С. 362-365. – EDN HBFXPJ.
4. Разработка многопользовательской онлайн-платформы для проведения робототехнических соревнований / Д.И. Шайхезадин, Н.С. Шаронов // Тинчуринские чтения - 2024 «Энергетика и цифровая трансформация»: Международная молодежная научная конференция. В четырех томах, Казань, 24–26 апреля 2024 года. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2024. Том 2. – С. 644-6475. .
5. Пустыльник, П. Н. Развитие практики проведения соревнований по образовательной робототехнике в онлайн-формате / П. Н. Пустыльник, Т. С. Филиппова // Педагогическая наука и современное образование : доклады секционных заседаний VIII научно-практической конференции с международным участием, посвященной Дню российской науки, Санкт-Петербург, 10–11 февраля 2021 года. – Санкт-Петербург: Издательство Российского государственного педагогического университета им. А. И. Герцена, 2021. – С. 67-70. – EDN JBROPO.

Информация об авторах

Богданов Александр Нетфуллович, к.т.н., доцент кафедры «Автоматизация технологических процессов и производств», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет» (ФГБОУ ВО «КГЭУ»), Россия, Республика Татарстан, 420066, г. Казань, ул. Красносельская, д. 51, ban.mic@mail.ru

Шайхезадин Дамир Инсафович, инженер-исследователь, ФГБОУ ВО «КГЭУ», Россия, Республика Татарстан, 420066, г. Казань, ул. Красносельская, д. 51, Shajhezadin2013@yandex.ru

Шаронов Никита Сергеевич, инженер-исследователь, ФГБОУ ВО «КГЭУ», Россия, Республика Татарстан, 420066, г. Казань, ул. Красносельская, д. 51, nemorex01@gmail.com

Виртуальная реальность как инструмент для подготовки операторов беспилотных летательных аппаратов

М.Ю. Серебряков
Санкт-Петербургский Государственный Морской Технический Университет (СПбГМТУ), Санкт-Петербург, Россия, serebryakov@smtu.ru

Аннотация
В статье рассматривается использование технологий виртуальной реальности для подготовки операторов беспилотных летательных аппаратов. Описаны традиционные методы обучения операторов и преимущества применения виртуальной реальности, такие как повышение вовлеченности и эффективности обучения, ускоренное освоение теоретических знаний и практических навыков. Проведен сравнительный анализ традиционных и виртуальных методов обучения, который показал, что виртуальная реальность сокращает время подготовки и снижает затраты. Отдельное внимание уделено проблемам виртуальной реальности, связанным с контроллерами, комфортом использования шлемов и необходимостью интеграции реальных пультов управления для большей реалистичности.

Ключевые слова
Виртуальная реальность, беспилотный летательный аппарат, обучение операторов, симулятор, подготовка, тренажер, эффективность.

Благодарности
Исследования выполнены при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках реализации программы «Приоритет 2030».

Virtual reality as a tool for training drone operators

Mikhail Y. Serebryakov
St. Petersburg State Marine Technical University (SPbSMTU), St. Petersburg, Russia, serebryakov@smtu.ru

Abstract
The article deals with the use of virtual reality technologies for training drone operators. Traditional methods of operator training and advantages of virtual reality application, such as increased involvement and efficiency of training, accelerated mastering of theoretical knowledge and practical skills, are described. A comparative analysis of traditional and virtual training methods is carried out, which showed that virtual reality reduces training time and costs. Special attention is paid to the problems of virtual reality related to controllers, comfort of helmet use and the need to integrate real control panels for greater realism.

Key words
Virtual reality, unmanned aerial vehicle, operator training, simulator, training, simulator, effectiveness.

Acknowledgements
Ministry of Education and Science of Russia within the framework of the strategic academic leadership program «Priority-2030».

Введение

В современном мире стремительное развитие робототехники и автоматизированных систем оказывает значительное влияние на различные сферы деятельности. Обучение операторов беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) становится одним из ключевых направлений в подготовке специалистов, востребованных в сельском хозяйстве, мониторинге окружающей среды, поисково-спасательных операциях, а также в сфере безопасности и обороны. Технологии виртуальной реальности (VR) открывают новые горизонты для эффективного обучения, делая процесс более интерактивным и погружающим.

Молодое поколение проявляет повышенный интерес к интерактивным цифровым технологиям, позволяющим им окунуться в захватывающие виртуальные миры. Этот интерес можно и необходимо использовать в образовательных целях. Исследования показывают, что использование VR в обучении повышает вовлеченность учащихся и способствует лучшему усвоению материала. Виртуальная реальность не только делает образовательный процесс более привлекательным, но и предоставляет возможность моделировать сложные и опасные ситуации без риска для жизни и здоровья [1, 2]

Ранее в Институте робототехники и интеллектуальных систем при СПбГМТУ был создан симулятор для обучения управлению вертолетами, который успешно использовался для подготовки пилотов [3 – 5]. Учитывая современные тенденции и растущие требования к подготовке операторов БПЛА, было принято решение модернизировать симулятор, добавив поддержку устройств виртуальной реальности. Кроме того, расширен функционал симулятора за счет возможности тренировки управления беспилотными летательными аппаратами роторного типа, что значительно повысило его практическую ценность.

Данная работа посвящена исследованию применения технологий виртуальной реальности в процессе обучения операторов БПЛА. В ходе исследования рассматриваются современные методы подготовки специалистов, анализируются преимущества использования VR-технологий, а также оценивается эффективность внедренного симулятора в образовательный процесс. Полученные результаты могут быть полезны для образовательных учреждений и организаций, занимающихся подготовкой операторов беспилотных систем, и могут способствовать повышению качества обучения в данной области.

Современные методы обучения операторов БПЛА

Обучение операторов беспилотных летательных аппаратов постоянно развивается, интегрируя современные технологии и подходы для повышения эффективности подготовки специалистов. Современные методы обучения сочетают в себе теоретическую базу и практические навыки, используя при этом инновационные инструменты и средства. Среди основных методов можно выделить следующие:

– Использование симуляторов и тренажеров. Симуляторы и тренажеры являются ключевыми инструментами в подготовке операторов БПЛА. Они позволяют моделировать реальные полетные условия, включая различные сценарии и непредвиденные ситуации, без риска для оборудования и окружающей среды [6]. Это способствует развитию практических навыков и оперативного принятия решений в условиях, максимально приближенных к реальным.

– Виртуальная и дополненная реальность. Технологии виртуальной реальности и дополненной реальности (AR) активно внедряются в образовательный процесс. VR обеспечивает полное погружение в виртуальную среду, что повышает уровень вовлеченности и усвоения материала [7]. AR-технологии позволяют накладывать цифровую информацию на реальный мир, что может быть полезно при обучении на местности и в реальных условиях эксплуатации [8].

– Онлайн-платформы и дистанционное обучение. С развитием интернет-технологий дистанционное обучение становится все более популярным. Онлайн-платформы предлагают широкий спектр образовательных ресурсов, включая видеоуроки, интерактивные модули и вебинары, что позволяет учащимся обучаться в удобное для них время и темпе [9].

– Геймификация образовательного процесса. Применение геймификации в обучении операторов БПЛА способствует повышению мотивации и вовлеченности. Использование игровых элементов, систем поощрений и соревнований стимулирует активное участие учащихся и улучшает усвоение знаний [10].

– Практические полеты и реальный опыт. Несмотря на широкое использование технологий, практические занятия с реальными БПЛА остаются неотъемлемой частью обучения. Они позволяют операторам применить полученные знания на практике, развивая навыки, необходимые для безопасной и эффективной эксплуатации аппаратов [11].

– Комплексный подход к обучению. Наиболее эффективным считается комбинированный подход, который сочетает теоретические занятия, использование симуляторов и VR/AR-технологий, дистанционное обучение и практические полеты. Такой подход обеспечивает всестороннюю подготовку операторов, готовых к выполнению задач в различных условиях [12].

Применение виртуальной реальности в образовании

Технологии виртуальной реальности активно внедряются в образовательный процесс, предоставляя новые возможности для обучения и повышения эффективности усвоения материала. VR создает погружающую среду, где учащиеся могут взаимодействовать с учебным контентом в интерактивной форме, что способствует более глубокому пониманию сложных концепций [13].

Одним из ключевых преимуществ VR в образовании является повышение уровня вовлеченности и мотивации учащихся. Интерактивные и реалистичные сценарии обучения стимулируют интерес и активное участие в учебном процессе [14]. Это особенно актуально для современных студентов, привыкших к цифровым технологиям и интерактивным медиа. VR позволяет визуализировать абстрактные или недоступные для непосредственного наблюдения явления, такие как микроскопические процессы или космические объекты. Благодаря этому учащиеся получают возможность изучать сложные темы в наглядной и понятной форме, что повышает эффективность обучения.

Виртуальная реальность предоставляет безопасную среду для отработки практических навыков. В области медицины, инженерии и авиации VR-симуляторы позволяют учащимся тренироваться в условиях, максимально приближенных к реальным, без риска для здоровья и оборудования [15]. Это особенно важно при подготовке операторов БПЛА, где практические навыки управления имеют решающее значение.

VR-технологии позволяют адаптировать учебный процесс под индивидуальные потребности каждого учащегося [17]. Системы могут учитывать уровень подготовки, скорость усвоения материала и предпочтительные стили обучения, предоставляя персонализированный опыт и повышая общую эффективность обучения.

Виртуальная реальность также способствует развитию навыков сотрудничества и коммуникации. Мультипользовательские VR-среды позволяют учащимся взаимодействовать друг с другом в виртуальном пространстве, выполняя совместные задания и проекты [18]. Это развивает командные навыки и способствует более глубокому усвоению материала через коллективное обучение.

Несмотря на очевидные преимущества, внедрение VR в образование сталкивается с рядом препятствий. Высокая стоимость оборудования, технические сложности и необходимость разработки качественного контента могут ограничивать применение VR в учебных заведениях [19]. Кроме того, существуют опасения по поводу возможных негативных эффектов на здоровье, таких как укачивание или зрительное напряжение.

Добавление виртуальной реальности

Изначально симулятор был разработан для настольных компьютеров с целью обучения операторов управлению вертолетами. Эта версия симулятора позволяла пользователям отрабатывать базовые и продвинутые навыки пилотирования в условиях, приближенных к реальным, используя обычные мониторы и периферийные устройства, такие как клавиатуры, мыши и джойстики. Основной задачей симулятора было создание безопасной и контролируемой среды, в которой операторы могли бы учиться и совершенствовать навыки управления вертолетом, без необходимости использования дорогостоящих физических тренажеров.

Программная архитектура симулятора была разработана на базе игрового движка Unity, что позволило обеспечить высокую производительность и гибкость в реализации различных сценариев полета. Математическая модель вертолета, включающая физику и динамику движения, была интегрирована с возможностями Unity, что делало симулятор достаточно полезным для образовательных целей (рис. 1).

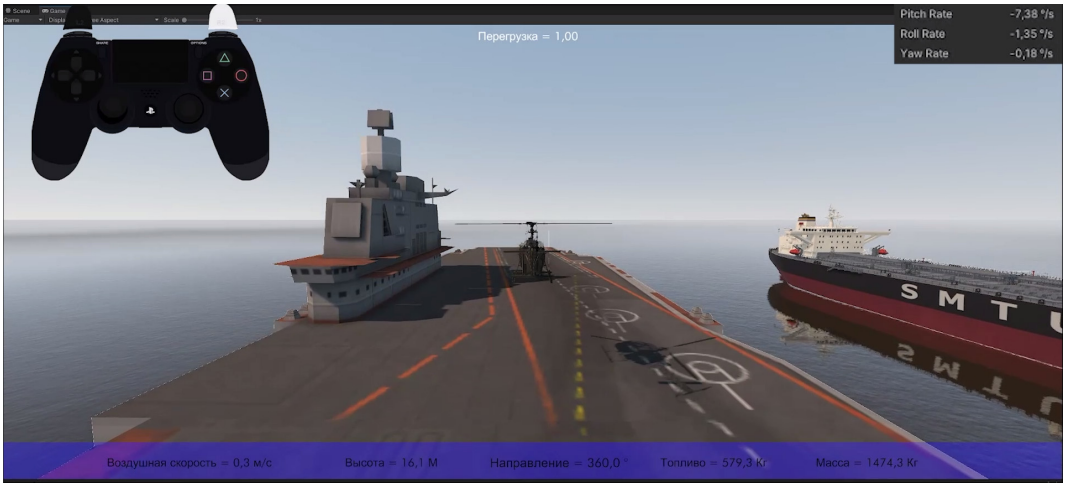


Рисунок 1 — Фрагмент работы симулятора

Однако у симулятора были и ограничения. Поскольку он использовал традиционные периферийные устройства ввода, такие как клавиатуры и мыши, пользователи не могли полностью погружаться в процесс управления. Взаимодействие с интерфейсом было ограничено стандартными способами ввода, что не всегда отражало реальный опыт управления летательными аппаратами. Это снижало эффективность обучения, особенно в сложных ситуациях, таких как аварийные сценарии или управление в экстремальных условиях [3 – 5].

Хотя симулятор для настольных ПК предоставлял множество возможностей для обучения операторов, его использование оставалось ограниченным по ряду причин. Во-первых, традиционные методы взаимодействия через монитор и клавиатуру/мышь не обеспечивали полного погружения. Например, контроль за действиями в симуляторе через джойстик или клавиатуру значительно отличался от того, как эти действия выполнялись бы в реальной кабине пилота или операторской станции БПЛА.

Кроме того, симулятор на настольных ПК не мог полностью передать ощущение пространства и маневренности, что особенно важно для точного управления вертолетами или дронами в ограниченных и сложных условиях. Например, отсутствие периферийного зрения и тактильной обратной связи делало процесс управления менее интуитивным, особенно для начинающих операторов.

Поддержка устройств виртуальной реальности была интегрирована в симулятор с целью улучшения восприятия и взаимодействия оператора с обучающей средой. Технология VR позволяет создать погружающую виртуальную среду, в которой операторы могут тренироваться в управлении беспилотными летательными аппаратами, получая более реальное представление о ситуациях, с которыми они могут столкнуться в реальной жизни.

Использование шлемов виртуальной реальности, таких как HP Reverb G2 VR или Oculus Quest 2, в сочетании с игровым движком Unity, позволяет симулировать управление БПЛА с точной физикой и

взаимодействием с окружающей средой. Технология VR особенно полезна для отработки сложных сценариев, таких как управление дроном в условиях ограниченной видимости или при возникновении аварийных ситуаций. Взаимодействие с VR-контроллерами позволяет оператору использовать реальные жесты, имитирующие работу с физическими устройствами, такими как ручки управления или кнопки на пульте.

Для создания более интерактивной среды были добавлены элементы, такие как виртуальные рычаги и кнопки. Например, система виртуальных рычагов (рис. 2) предоставляет возможность пользователю управлять различными параметрами летального аппарата, такими как угол наклона и рычаги управления, используя контроллеры VR. Виртуальные кнопки позволяют взаимодействовать с приборной панелью вертолета, включая или отключая системы, необходимые для выполнения задач (рис. 2). Эти элементы были тщательно настроены для того, чтобы обеспечить пользователю интуитивное взаимодействие и управление.

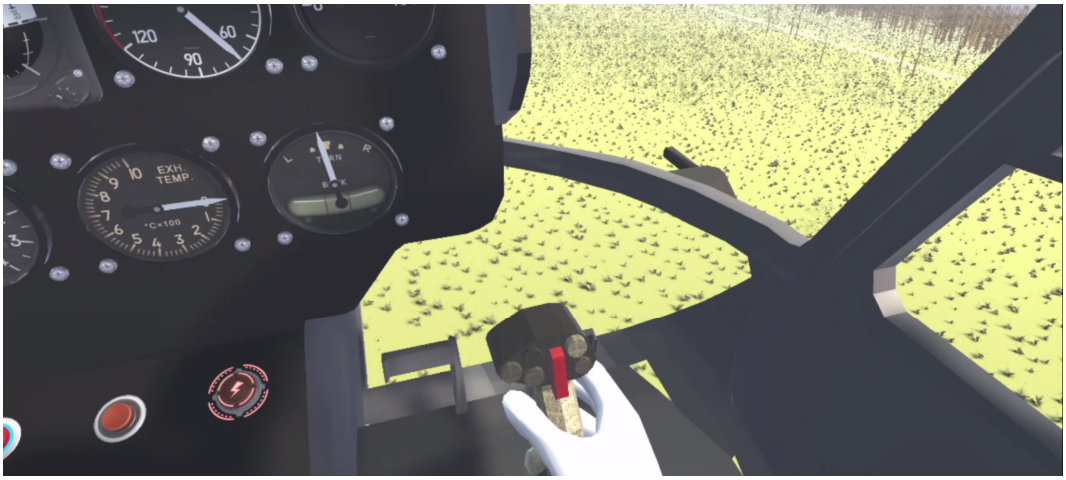


Рисунок 2 — VR-версия симулятора с виртуальными рычагами и приборной панелью вертолета

Интеграция беспилотных летательных аппаратов в симулятор

С расширением функционала симулятора для поддержки БПЛА возникла необходимость в модернизации системы управления и добавлении новых модулей, таких как контроллеры полета, электродвигатели, аккумуляторы, и двигатели для симуляции беспилотных летательных аппаратов. Эти элементы обеспечивают реалистичное управление дронами, от настройки параметров полета до детального моделирования поведения летательных аппаратов в различных условиях.

Контроллер полета обрабатывает входные данные и регулирует такие параметры, как угол наклона, скорость, высота и направление полета. Он поддерживает несколько режимов управления, включая ручной режим, стабилизацию и командное управление (рис. 3). Система стабилизации, реализованная через PID-контроллеры, позволяет точно регулировать наклон, крен и курс дрона для поддержания стабильности во время полета. Это особенно важно для обеспечения безопасности при выполнении автоматизированных задач, таких как мониторинг или доставка грузов.

Для работы дронов в симуляторе также были добавлены электродвигатели, которые взаимодействуют с системами аккумуляторов и контроллером полета. Электродвигатели управляют скоростью вращения роторов дрона, что непосредственно влияет на его подъемную силу и маневренность. Модуль двигателя симулирует работу силовой установки, включая потребление энергии, номинальные и предельные параметры мощности, а также состояние зарядки аккумуляторов.

Для координации работы всех роторов дрона был добавлен электронный регулятор скорости, который контролирует и синхронизирует скорость вращения каждого ротора. Это позволяет дрону поддерживать стабильный полет и корректировать направление движения, реагируя на изменения в условиях окружающей среды или команды оператора. ESC рассчитывает и передает сигналы на двигатели, чтобы поддерживать оптимальный режим работы в зависимости от текущего состояния полета и команд, поступающих от контроллера. При адаптации симулятора для поддержки квадрокоптеров возникла необходимость в изменении некоторых параметров, связанных с аэродинамическими эффектами и демпфированием. В отличие от вертолетов, квадрокоптеры используют несколько роторов (обычно четыре), каждый из которых контролируется отдельно, что требует изменений в моделировании тяги, подъемной силы и поведения аппарата при маневрировании.

Основное различие в аэродинамике заключается в том, что квадрокоптеры, благодаря симметричной конфигурации роторов, создают тягу за счет согласованного вращения всех роторов. Это потребовало корректировки модели подъемной силы и добавления демпфирования для учета влияния каждого отдельного ротора на общую устойчивость аппарата. Для этого была использована формулы, описывающая суммарную тягу, которая зависит от оборотов каждого ротора.

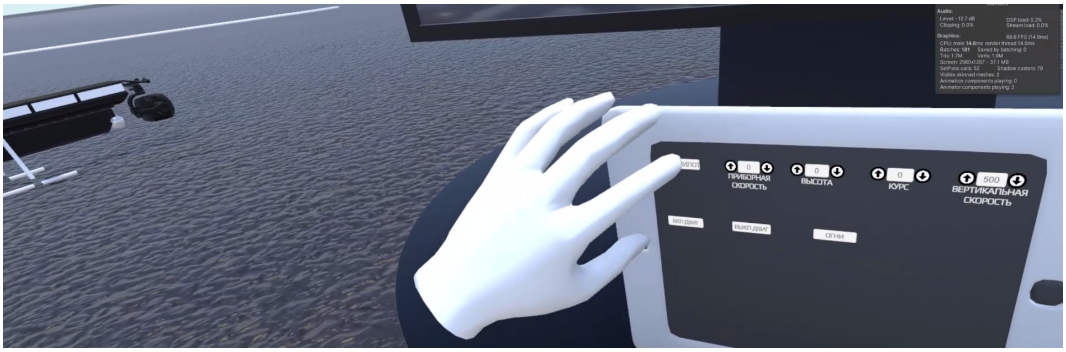


Рисунок 3 — VR-версия симулятора с командным управлением БПЛА

Для квадрокоптеров были добавлены дополнительные параметры демпфирования, так как их динамика несколько отличается от вертолетов. Квадрокоптеры обладают меньшей массой и более высокой маневренностью, что приводит к большей чувствительности к изменению угла атаки и оборотов роторов. В этой связи необходимо было настроить коэффициенты демпфирования для стабилизации квадрокоптера при резких маневрах.

Кроме того, для квадрокоптера было важно правильно настроить управляющие коэффициенты для балансировки роторов. Эти коэффициенты влияют на распределение тяги между роторами и позволяют аппарату выполнять повороты, наклоны и изменения высоты. Они были настроены на основе экспериментальных данных с квадрокоптера «Снежинка», разработанного в Институте робототехники и интеллектуальных систем.

Сравнительный анализ эффективности обучения операторов с использованием виртуальной реальности

Сравнение традиционных методов обучения операторов БПЛА с использованием виртуальной реальности показало, что VR значительно повышает эффективность подготовки. Операторы, обучающиеся с помощью VR, демонстрируют более высокую вовлеченность и лучшее усвоение материала за счет интерактивной среды. Практические навыки отрабатываются быстрее и безопаснее, так как в VR можно моделировать сложные или аварийные ситуации без риска для реального оборудования.

Кроме того, обучение с VR позволяет сократить время подготовки на 15-25% и снизить затраты, так как уменьшается необходимость в использовании физических тренажеров и реальных полетов. VR также предоставляет гибкость и доступность, позволяя учащимся тренироваться в любое удобное для них время, что делает процесс обучения более эффективным и доступным.

Использование виртуальной реальности для обучения операторов БПЛА имеет несколько проблем, связанных с контроллерами и комфортом. Оригинальные контроллеры шлемов ВР обычно имеют два триггера: один для сжатия большого и указательного пальца, другой — для остальных трех. Это создает трудности, так как операторы традиционно держат пульты управления четырьмя пальцами, а стиками управляют одним. Хотя существуют шлемы, поддерживающие отслеживание рук без контроллеров, такие устройства обычно дороже и требуют определенных условий, таких как хорошее освещение, что не всегда удобно. Однако эта проблема легко решается подключением реальных пультов управления БПЛА, что обеспечивает максимальную реалистичность в тренировках.

Кроме того, VR требует свободного пространства для безопасного перемещения оператора, что может стать проблемой в небольших помещениях. Также качество графики и разрешение шлемов могут оказаться недостаточными для точной симуляции, что влияет на восприятие деталей интерфейса и объектов. Длительное использование шлемов может вызвать дискомфорт в области шеи и головы из-за их веса, а также привести к головокружению или тошноте. Еще одним фактором является задержка между действиями пользователя и реакцией в виртуальной среде, что может снизить реалистичность симуляции и замедлить процесс обучения.

Эти ограничения требуют подбора соответствующего оборудования и правильной организации учебной среды, а также учета физических и технических возможностей VR для обеспечения максимального комфорта и эффективности обучения.

Заключение

Использование виртуальной реальности для обучения операторов беспилотных летательных аппаратов открывает новые возможности для более интерактивного, погружающего и безопасного процесса подготовки. ВР-технологии позволяют визуализировать сложные теоретические концепции, а также эффективно отрабатывать практические навыки в условиях, близких к реальным, но без риска для оборудования и окружающей среды. Анализ показал, что обучение с использованием VR сокращает время подготовки, повышает вовлеченность и мотивацию операторов, а также снижает затраты.

Однако использование VR также связано с рядом проблем. Ограничения контроллеров, дискомфорт от длительного использования шлемов, требования к пространству и условиям освещения, а также возможные проблемы с качеством графики и задержками — все это необходимо учитывать при разработке обучающих

программ. Несмотря на эти недостатки, ВР представляет собой мощный инструмент, который, при правильной настройке и интеграции, может значительно повысить качество обучения операторов БПЛА, делая его более гибким, доступным и эффективным.

Литература

1. Побокин П.А. Целесообразность использования средств виртуальной реальности в курсе стереометрии // Психология когнитивных процессов [под ред. Егорова А.Г., Селиванова В.В.]. Материалы 4-ой всероссийской, научно- практической конференции (сборник статей). - Смоленск: Универсум, 2013.
2. Побокин П.А. Информационные технологии как одно из средств активизации мыслительного процесса учеников // Идеи О.К. Тихомирова и А.В. Брушлинского и фундаментальные проблемы психологии. Материалы всероссийской конференции с иностранным участием [Отв. ред. Ю.П. Зинченко, А.Е. Войскунский, Т.В. Корнилова]. - М.: МГУ, 2013.
3. Современные проблемы проектирования и создания компьютерных тренажеров на базе симулятора вертолета / А. А. Жиленков, М. Ю. Серебряков // Оборонный комплекс - научно-техническому прогрессу России. – 2024. – № 1(161). – С. 26-32. – DOI 10.52190/1729-6552_2024_1_26.
4. Компьютерный тренажер на базе симулятора вертолета / М. Ю. Серебряков, И. С. Моисеев // Экстремальная робототехника. – 2023. – № 1(34). – С. 402-409.
5. M. Serebryakov, «Contemporary Issues in the Design and Creation of Computer-based Helicopter Simulator Training Systems», 2024 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Sochi, Russian Federation, 2024, pp. 1107-1112, doi: 10.1109/ICIEAM60818.2024.10553884.
6. Kimon P. Valavanis. Advances in Unmanned Aerial Vehicles. State of the Art and the Road to Autonomy. – 2007, Springer, https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6114-1.
7. Jerald, J. (2015). The VR Book: Human-Centered Design for Virtual Reality. Morgan & Claypool. DOI:10.1145/2792790.
8. Billinghurst, M., Clark, A., & Lee, G. (2015). A Survey of Augmented Reality. Foundations and Trends in Human–Computer Interaction, № 8(2-3), pp.73-272, DOI:10.1561/1100000049.
9. Anthony Ralston. Perspectives on Open and Distance Learning: Increasing Access through Mobile Learning, 2014.
10. Deterding, Sebastian & Dixon, Dan & Khaled, Rilla & Nacke, Lennart. (2011). From Game Design Elements to Gamefulness: Defining Gamification. Proceedings of the 15th International Academic MindTrek Conference: Envisioning Future Media Environments, MindTrek, 2011, № 11, pp. 9-15, 10.1145/2181037.2181040.
11. Cummings, Missy & Guerlain, Stephanie. Developing Operator Capacity Estimates for Supervisory Control of Autonomous Vehicles. Human factors, 2007, № 49, pp. 1-15. 10.1518/001872007779598109.
12. Salas, Eduardo & Tannenbaum, Scott & Kraiger, Kurt & Smith-Jentsch, Kimberly. The Science of Training and Development in Organizations: What Matters in Practice. Psychological Science in the Public Interest, 2012, № 13, pp. 74-101, 10.2307/23484697.
13. Freina, Laura & Ott, Michela. (2015). A Literature Review on Immersive Virtual Reality in Education: State Of The Art and Perspectives. 10.12753/2066-026X-15-020.
14. Radianti, J., Majchrzak, T. A., Fromm, J., & Wohlgenannt, I. (2020). A systematic review of immersive virtual reality applications for higher education: Design elements, lessons learned, and research agenda. Computers & Education, 147, 103778, https://doi.org/10.1016/j.compedu.2019.103778.
15. Makransky, Guido & Terkildsen, Thomas & Mayer, Richard. (2017). Adding Immersive Virtual Reality to a Science Lab Simulation Causes More Presence But Less Learning. Learning and Instruction. 60. 10.1016/j.learninstruc.2017.12.007.
16. Kavanagh, S., Luxton-Reilly, A., Wuensche, B., & Plimmer, B. (2017). A systematic review of virtual reality in education. Themes in Science and Technology Education, 10(2), 85-119.
17. Merchant, Z., Goetz, E. T., Cifuentes, L., Keeney-Kennicutt, W., & Davis, T. J. (2014). Effectiveness of virtual reality-based instruction on students' learning outcomes in K-12 and higher education: A meta-analysis. Computers & Education, 70, 29-40, https://doi.org/10.1016/j.compedu.2013.07.033.
18. Jensen, Lasse & Konradsen, Flemming. (2018). A review of the use of virtual reality head-mounted displays in education and training. Education and Information Technologies. 23. 1-15. 10.1007/s10639-017-9676-0.
19. Bailenson, J. N. (2018). Experience on Demand: What Virtual Reality Is, How It Works, and What It Can Do. W. W. Norton & Company.

Информация об авторе

Серебряков Михаил Юрьевич, преподаватель кафедры киберфизических систем, Санкт-Петербургский Государственный Морской Технический Университет (СПбГМТУ), Россия, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, д. 3, serebryakov@smtu.ru, ORCID: 0009-0007-3699-6232

Методическое обеспечение образовательной деятельности в области робототехники и БПЛА: современный подход

М.Е. Данилин, О.П. Меньшиков, К.Н. Юсупова✉, К.Р. Ахтямов, И.И. Инин
Общество с ограниченной ответственностью «АВАНТИ-СОФТ» (ООО «АВАНТИ-СОФТ»), г. Иннополис, Республика Татарстан, Россия, metod@avgr.tech

Аннотация
В статье рассматриваются аспекты внедрения новых технологий в образовательные программы, акцентируя внимание на сочетании традиционных и инновационных методов обучения, включая технологии искусственного интеллекта. Подчеркивается, что успешное обучение требует не только современного оборудования, но и качественного методического обеспечения, включающего учебные материалы и цифровые ресурсы. Описываются подходы компании «АВАНТИ-СОФТ» к подготовке специалистов, акцентируя внимание на важности адаптации курсов к требованиям рынка труда и обновлении методических материалов.

Ключевые слова
Робототехника, беспилотные летательные аппараты, образовательные технологии, методическое обеспечение, учебные программы, инновационные методы, инженерные навыки, цифровые ресурсы, технологии искусственного интеллекта, практическое обучение, образовательные платформы, педагогическая поддержка, сотрудничество с компаниями, оценка образовательной деятельности, проектная деятельность, технические навыки.

Methodological support of educational activities in the field of robotics and UAVs: a modern approach

Maxim E. Danilin, Oleg P. Menshikov, Kristina N. Yusupova✉, Kamil R. Akhtyamov, Igor I. Inin
AVANTI-SOFT Limited Liability Company (AVANTI-SOFT LLC), Innopolis, Republic of Tatarstan, Russia, metod@avgr.tech

Annotation
The article examines aspects of the introduction of new technologies into educational programs, focusing on the combination of traditional and innovative teaching methods, including artificial intelligence technologies. It is emphasized that successful training requires not only modern equipment, but also high-quality methodological support, including educational materials and digital resources. The approaches of AVANTI-SOFT to the training of specialists are described, focusing on the importance of adapting courses to the requirements of the labor market and updating methodological materials.

Key words
Robotics, unmanned aerial vehicles, educational technologies, methodological support, training programs, innovative methods, engineering skills, digital resources, artificial intelligence technologies, practical training, specialized equipment, educational platforms, pedagogical support, cooperation with companies, evaluation of educational activities, project activities, technical skills.

Развитие робототехники и беспилотных летательных аппаратов (далее – БПЛА) существенно изменило многие отрасли, включая образование. Эти технологии стали неотъемлемой частью учебного процесса, помогая развивать у школьников и студентов инженерные навыки, критическое мышление и умение решать практические задачи.

Однако, для применения этих технологий в образовательных организациях необходимо не только внедрить новое оборудование в учебный процесс, но и изменить подход к обучению, разработать методическое обеспечение, включающее учебные программы, современные методики и цифровые ресурсы.

В данном докладе рассмотрены подходы к методическому обеспечению образовательной деятельности в области робототехники и БПЛА компании «Аванти-Софт», а также определены основные тенденции и перспективы интеграции этих технологий в образовательные программы.

Ключевую роль в успешном внедрении робототехники и БПЛА в учебные программы играет методическое обеспечение образовательного процесса. Где ключевыми элементами являются актуальные учебные материалы и пособия, которые помогают преподавателям организовать учебный процесс. Педагоги нуждаются не только в теоретических знаниях, но и в практических методах, адаптированных к технологическим дисциплинам. Необходимо применение новых подходов и технологий, чтобы учителя могли эффективно работать с современными образовательными платформами и оборудованием.

Учебные программы должны соответствовать требованиям рынка труда и включать актуальные знания. Так цифровые ресурсы, например, специализированные образовательные платформы и электронные учебники, становятся важным инструментом обучения, позволяя обучающимся получать доступ к материалам и выполнять задания в удобном темпе.

Методы преподавания должны учитывать специфику робототехники и БПЛА, сочетая традиционные подходы с инновационными, такими как интерактивное обучение и игровые методики, что делает процесс более увлекательным.

Внедрение робототехники и БПЛА в учебный процесс начинается в школе, формируя интерес у детей к технологиям и инженерии, позволяя решать практические задачи с робототехническими системами и дронами.

Важную роль играют и внеклассные мероприятия, такие как кружки, конкурсы, олимпиады, соревнования, помогающие обучающимся продемонстрировать свои навыки и получить соревновательный опыт. Такие мероприятия развивают инженерные способности и мотивируют к дальнейшему обучению.

Стоит отметить, что качество обучения улучшает и обмен опытом между образовательными учреждениями, сотрудничество с технологическими компаниями и исследовательскими организациями, при участии которых можно развить инновационные программы и получить доступ к новым технологиям.

Таким образом, интеграция робототехники и БПЛА требует комплексного подхода, включая разработку курсов и активное сотрудничество с внешними организациями, что способствует подготовке квалифицированных специалистов для современных технологических вызовов.

Ключевым элементом образовательных процессов является использование специализированного оборудования и программного обеспечения, что позволяет не только изучать теорию, но и активно применять полученные знания на практике. Современные технологии предоставляют широкий спектр инструментов для более эффективного обучения школьников и студентов техническим решениям.

Например, учебный квадрокоптер «Тинивуп», программируемый квадрокоптер «А3», образовательный конструктор квадрокоптера «А5», конструктор спортивного квадрокоптера «А7-Т» и др. Эти устройства позволяют обучающимся изучать основы электроники и программирования. Для управления дронами используются симуляторы, в том числе симулятор для отработки ручных и автономных полетов, разработанный специалистами компании Аванти. Этот тренажер помогает отрабатывать навыки пилотирования без риска для оборудования, моделируя различные сценарии полетов, предоставляя возможность тренироваться в безопасной среде, повторяя реальный опыт полетов и развивать навыки управления БПЛА, что особенно полезно для начинающих пилотов - школьников.

Так же важно знание языков программирования C++, Python и системы ROS (Robot Operating System), это помогает обучающимся управлять сложными роботами. В том числе можно использовать технологии искусственного интеллекта (далее - ИИ). Например, в квадрокоптере «А5» технологии ИИ обеспечивают автономное управление полетом, распознавание объектов и обработку данных с сенсоров, что помогает избегать препятствий. С помощью этих функций в проектной деятельности дрон может имитировать мониторинг, доставку грузов и осуществлять инспекцию и применятся в других подобных школьных проектах.

Отметим, что для эффективного внедрения инновационных технологий в учебные программы значительными препятствиями являются проблемы именно методического обеспечения образовательной деятельности. Внедрение робототехники и БПЛА требует специалистов с необходимыми компетенциями, и преподаватели часто испытывают сложности в освоении новых технологий.

В связи с этим, для обеспечения качественного обучения и поддержки педагогов в процессе внедрения новых технологий все продукты компании Аванти сопровождаются методическими материалами, включающими учебные программы, теоретические материалы, практические задания, инструкции по эксплуатации, программированию и др.

Методические материалы направлены на поддержку педагогов в освоении новых технологий и методик, связанных с преподаванием робототехники и БПЛА. Помогают учителям быть в курсе современных образовательных инструментов, необходимых для эффективного преподавания, охватывают темы от основ программирования до применения дронов в различных сферах, позволяя педагогам использовать новые знания в обучении.

Оценка результатов образовательной деятельности также важна. Преподавателям необходимо использовать разнообразные методы для объективной оценки прогресса обучающихся, сочетая традиционные методы с практическими заданиями и проектами. Работая над реальными задачами, обучающиеся применяют теоретические знания на практике, что способствует развитию их инженерных навыков.

Таким образом, перспективы развития образовательной деятельности в области робототехники и БПЛА открывают новые возможности для совершенствования учебных программ и методик. Будущее образования в этих сферах связано с внедрением технологий, способных значительно улучшить процесс обучения и сделать его более доступным и эффективным, например, технологии ИИ.

Важное значение имеет и обмен опытом, сотрудничество с другими учебными заведениями, это помогает интегрировать передовые практики и повысить качество обучения.

Таким образом, методическое обеспечение в области робототехники и БПЛА является ключевым элементом для качественного и эффективного обучения новым технологиям, и преподаватели должны иметь необходимые ресурсы и поддержку для качественного внедрения этих дисциплин в образовательные программы.

Рекомендации для дальнейшего развития методического обеспечения: усиление подготовки педагогов через курсы повышения квалификации, расширение доступа к современным образовательным ресурсам и развитие партнерств между учреждениями и частными компаниями. Важно также изучать международный опыт и применять лучшие практики.

В этом контексте компания Аванти, являясь частью высокотехнологичного производственного кластера России, активно содействует подготовке квалифицированных кадров в инженерной области.

Компания активно развивает национальные информационные технологии, уделяя особое внимание созданию и продвижению новых продуктов в сферах робототехники, электроники и программирования. Обладая собственной лабораторией и производственными мощностями, она внедряет уникальную концепцию подготовки специалистов, охватывающую все уровни образования — от дошкольного до высшего.

Наша стратегическая задача заключается в создании надежной платформы для подготовки кадров, востребованных в сфере высоких технологий. Сотрудники компании занимаются как технической, так и методической поддержкой, разрабатывая учебные материалы по робототехнике, электронике и беспилотным летательным аппаратам в соответствии с Федеральными государственными образовательными стандартами (ФГОС). Эти материалы интегрируются в образовательные учреждения и центры дополнительного образования.

Компания Аванти является стратегическим партнером различных мероприятий/соревнований и разработчиком конкурсного оборудования.

Сотрудники компании являются главными экспертами в оценке профессиональных мастерства на различных фестивалях, чемпионатах и соревнованиях, а также участвуют в соревнованиях по беспилотным летательным аппаратам, используя гоночные и программируемые дроны собственного производства. Таким образом, компания разрабатывает и тестирует свою продукцию в реальных условиях.

Рассмотрим продукцию компании, включающую различные робототехнические комплексы, такие как беспилотные летательные аппараты, роботы-манипуляторы и гуманоидные роботы. Наибольшую долю занимают беспилотные летательные аппараты, среди которых представлены квадрокоптеры разных размеров и функциональных возможностей.

В линейке имеются малые дроны Тинивупы, оснащенные бесколлекторными двигателями и FPV оборудованием, предназначенные для гонок в помещениях и безопасны для использования благодаря закрытым пропеллерам. Учебный программируемый квадрокоптер «А3» управляется через программное обеспечение и мобильные устройства, имеет защитный карбоновый корпус и интегрированный набор датчиков.

Квадрокоптер А7-Т отличается высокой скоростью и маневренностью, что делает его идеальным для гоночных трасс. Квадрокоптер «А5» сочетает в себе обучение техническим навыкам, программированию и основам пилотирования, позволяя детям наблюдать за полетом дрона и анализировать результаты. Продвинутая функция FPV управления дает возможность учащимся почувствовать себя пилотами [1].

Компания также предлагает роботы-манипуляторы, представляющие собой компактные модульные конструкции с собственным ПО. Эти роботы обучают основам промышленной робототехники, программированию на языках Scratch, Python, JavaScript и C++, а также помогают понять механику и компьютерное зрение. Легко заменяемые модули позволяют превратить обычный стол в творческую студию для создания миниконвейеров [1,2].

Все дроны и четырехосевой робот-манипулятор имеют заключения о подтверждении производства на территории России. Компания также разрабатывает другие робототехнические комплекты и наборы электроники.

Как было указано выше, каждый продукт компании сопровождается индивидуальным набором материалов, который определяется его сложностью, функциональностью и целями. Независимо от этого, к каждому продукту прилагается образовательная программа, будь то учебная или дополнительная. Например, для дронов учебно-методический комплекс включает программу, продолжительность которой может варьироваться от 72 до 288 часов, в зависимости от уровня подготовки. Предоставляются методические рекомендации по работе с оборудованием, такие как инструкции по сборке, настройке, подключению пульта к симулятору и примеры автономного управления и многое другое. Наша компания активно поддерживает преподавателей в области робототехники, предлагая тренинги и семинары по новым технологиям, а также доступ к обновляемым методическим материалам и технической поддержке [1].

Таким образом, учебно-методический комплекс направлен на создание качественного образовательного процесса, интегрирующего современные технологии в обучение, соответствующего современным образовательным стандартам и требованиям рынка труда.

С фрагментами методических материалов можно ознакомиться на образовательном ресурсе компании - IT LECTORIUM, а полный доступ к материалам предоставляется при покупке оборудования.

В рамках методического обеспечения образовательной деятельности в области робототехники наша компания применяет комплексный подход к оценке и контролю качества. Мы регулярно собираем и анализируем обратную связь от преподавателей через опросы и интервью, что позволяет выявлять аспекты, требующие

улучшения. На основании полученных данных специалисты обновляют и совершенствуют методические материалы, обеспечивая высокое качество обучения и соответствие современным требованиям. Этот подход способствует постоянному улучшению образовательных ресурсов и их актуальности для педагогов и учащихся.

Компания реализовала успешные проекты в школах, получившие положительные отзывы от учителей. Внедрение робототехнических наборов и методических материалов привело к активному вовлечению учеников и улучшению их практических навыков, повысив интерес к техническим предметам. Интерактивные комплекты и инновационные пособия доказали свою эффективность в образовательном процессе.

В перспективе, мы планируем продолжить расширение методического обеспечения, включая новые технологии и оборудование, что позволит обновить учебные программы. Расширение спектра образовательных программ обеспечит более глубокое обучение, включая курсы по искусственному интеллекту и автоматизации, что поможет подготовить специалистов к требованиям рынка и поддерживать конкурентоспособность нашей компании.

Литература

1. Материалы: [сайт]. -URL: https://itlectorium.com/products (дата обращения: 22.10.2024).
2. Данилин М.Е., Бешенков С.А., Шутиква М.И., Рамазанов Р.Л. Информационные инструменты и технологии в цифровом социуме. Учебное пособие-Казань, 2023. -198 с.

Информация об авторах

Данилин Максим Евгеньевич, директор, общество с ограниченной ответственностью «АВАНТИ-СОФТ» (ООО «АВАНТИ-СОФТ»), Россия, 420500, Республика Татарстан, г. Иннополис, ул. Университетская, д. 7, пом. 602, а/я № 16, danilin.m@avgr.tech

Меньшиков Олег Павлович, начальник методического центра, ООО «АВАНТИ-СОФТ», Россия, 420500, Республика Татарстан, г. Иннополис, ул. Университетская, д. 7, пом. 602, а/я № 16, metod@avgr.tech

Юсупова Кристина Николаевна, заместитель начальника методического центра, о ООО «АВАНТИ-СОФТ», Россия, 420500, Республика Татарстан, г. Иннополис, ул. Университетская, д. 7, пом. 602, а/я № 16, metod@avgr.tech

Ахтямов Камиль Рашитович, программист, ООО «АВАНТИ-СОФТ», Россия, 420500, Республика Татарстан, г. Иннополис, ул. Университетская, д. 7, пом. 602, а/я № 16, ahtyamovgk@gmail.com

Инин Игорь Игоревич, начальник отдела передового программирования и информационных систем, ООО «АВАНТИ-СОФТ», Россия, 420500, Республика Татарстан, г. Иннополис, ул. Университетская, д. 7, пом. 602, а/я № 16, fiz.fill@mail.ru

Образовательный робототехнический комплекс для студентов

Е.В. Лебедева✉, В.А. Ложкин, М.С. Моисеенко
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет (СПБГМТУ), Санкт-Петербург, Россия, kata-lebedeva-2017@mail.ru

Аннотация
В данной статье обосновывается необходимость применения и его преимущества в учебном процессе образовательного робототехнического комплекса для подготовки студентов специальности «Мехатроника и робототехника». Приводится анализ и сравнение двух существующих моделей образовательного робота, выявлены их недостатки. Сформулированы требования и этапов разработки. Дано описание задействованных компонентов, написанного программного обеспечения, созданных учебных материалов и лабораторных работ, тестирования прототипа.

Ключевые слова
Робот, роботехнический комплекс, образовательный комплекс, программное обеспечение, omni-колёса, манипулятор, печатная плата, лабораторные работы, лидар, Raspberry Pi, микрокомпьютер, микроконтроллер, Linux, ROS, техническое зрение.

Благодарности
Исследования выполнены при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках реализации программы «Приоритет 2030».

Educational robotics complex for students

Ekaterina V. Lebedeva✉, Vladislav A. Lozhkin, Maxim S. Moiseenko
Saint Petersburg State Marine Technical University (SPbSMTU), St. Petersburg, Russia, kata-lebedeva-2017@mail.ru

Abstract
This article substantiates the need for the use and its advantages in the educational process of an educational robotic complex for the preparation of students of the specialty "Mechatronics and robotics". The analysis and comparison of two existing models of the educational robot are presented, their disadvantages are revealed. The requirements and stages of development are formulated. The description of the components involved, the written software, the created educational materials and laboratory work, and prototype testing is given.

Key words
Robot, robotics complex, educational complex, software, omni-wheels, manipulator, printed circuit board, laboratory work, lidar, Raspberry Pi, microcomputer, microcontroller, Linux, ROS, computer vision.

Acknowledgements
Ministry of Education and Science of Russia within the framework of the strategic academic leadership program «Priority-2030».

Введение

Существующая система образования предусматривает практическую отработку студентами дисциплин, преподаваемых в университете. Для этого используются практические, лабораторные и курсовые работы. Однако в настоящее время существует проблема нехватки средств для наглядной реализации практических заданий и примеров, ориентированных на эффективное обучение студентов специальности «Мехатроника и робототехника». Например, для физиков, электриков и материаловедов существуют учебно-лабораторные стенды — готовые учебные комплексы с интегрированными механизмами, устройствами и приборами, на которых отрабатывается практическая часть преподаваемых дисциплин. Для робототехников наиболее приближенными к этому являются учебные робототехнические комплексы, включающие самого робота (как собранного, так и в виде конструктора для сборки), программное обеспечение, учебные материалы и курс лабораторных работ.

Отсутствие возможности на практике отработать преподаваемые дисциплины является главной проблемой современного образовательного процесса. Выполнение исключительно абстрактных практических заданий без практического применения (управление ради управления, программирование ради программирования) значительно снижает эффективность обучения. Промежуточное место между выполнением абстрактных практических задач и работой с робототехническими учебными комплексами занимают курсовые работы.

Обычно, курсовая работа является показателем усвоения полученного при обучении материала и демонстрирует умение этот материал применять на практике. Такие работы можно отнести к расчётно-графическим или классифицировать как научно-исследовательские, в которых кроме применения знаний студент занимается исследованием определённой темы или области. Однако все курсовые работы объединяет одно — они выполняются в конце учебного семестра, и их количество значительно меньше по сравнению с практическими занятиями. Следовательно, если в учебном процессе будут использоваться только практические задания и курсовые работы, компетенции студентов, формируемые в ходе обучения, будут ограничены.

Если рассматривать участие студентов в больших и сложных проектах, сочетающих и требующих применения всего разнообразия преподаваемых дисциплин и получаемых знаний, то это доступно не каждому студенту. К таким проектам можно отнести создание роботов различных конструкций с нуля, проектирование отдельных узлов и механизмов, а также программирование компонентов и систем.

Именно поэтому наиболее подходящим и эффективным подходом к организации учебного процесса является приобретение университетами для своих факультетов и кафедр учебных наборов — образовательных робототехнических комплексов. В качестве типичных примеров можно привести роботов TurtleBro [1] от компании VoltBro и ROSMASTER X3 PLUS [2] от компании Yahboom:

– **TurtleBro** – учебно-методический комплекс, специально разработанный для изучения фреймворка Robot Operation System (далее – ROS). Он предназначен для проведения практических занятий в рамках учебных курсов для школьников и студентов. Комплекс включает программную и аппаратную платформу для изучения ROS, операционной системы Linux и принципов разработки современной робототехники, а также учебный курс, состоящий из теоретической и практической частей. Робот оснащён двумя моторами с энкодерами, вращающими два обычных колеса, лидаром, камерой, микрокомпьютером Raspberry Pi 4 model B и оригинальной платой управления. Управление платой реализовано на микроконтроллере STM32F4 с возможностью интеграции с ROS. Для пользовательских приложений на плате реализован блок с микроконтроллером ATmega2560, совместимым с Arduino IDE и платами расширения Arduino, способный функционировать как самостоятельное устройство. Питание робота обеспечивается блоком из четырёх литий-полимерных аккумуляторов формата 18650.

– **ROSMASTER** – учебно-методический комплекс, направленный не только на изучение ROS, но и на взаимодействие с различными датчиками, моторами и контроллерами. В комплекте поставляются образовательные материалы, включая руководства, учебные планы, примеры программ и другие ресурсы. Электронные компоненты комплекса включают большое разнообразие датчиков (датчики расстояния, гироскопы, акселерометры, вращающие четыре mecanum-колеса, различные камеры, включая камеру глубины), четыре мотора с энкодерами, шестизвенный манипулятор со встроенной камерой, лидар, джойстик для дистанционного управления, модуль голосового управления, сенсорный экран, четыре платы расширения и микрокомпьютер. Последний может быть одним из четырёх вариантов на выбор: Jetson Nano B01, Jetson Orin NX, Jetson Orin NANO и Raspberry Pi 5 (в нашем случае использовалась модель, оснащённая Jetson Nano B01). Питание комплекса осуществляется от блока из четырёх литий-полимерных аккумуляторов формата 18650.

Именно описанные выше модели образовательных робототехнических комплексов были приобретены с целью повышения качества и уровня процесса обучения. Таким образом, любые выводы основываются на опыте их эксплуатации. По результатам работы с учебными наборами были выявлены следующие недостатки:

1. Модель робота TurtleBro обладает ограниченным функционалом — она обладает меньшим, по сравнению с аналогами, количеством электронных и механических компонентов, с которыми можно взаимодействовать. Это ограничивает диапазон потенциальных навыков, которые могут быть приобретены студентами;
2. Для работы с ROSMASTER в версии, оснащённой Jetson Nano, существует высокий порог вхождения — требуются специальные навыки для эффективного использования данного микрокомпьютера.

Разработка

Требования к комплексу

Оба вышеописанных недостатка стали одними из причин принятия решения о разработке собственной версии образовательного робототехнического комплекса. Остальные причины приведены ниже и интегрированы в требования, предъявляемые к разработке учебного комплекса:

1. Возможность организовать процесс получения новых компетенций участниками студенческого конструкторского бюро (СКБ);
2. Создание сложных технических изделий, исходя из составляемых нами же требований, тем самым обеспечив возможность расширения программно-аппаратной составляющей робота под нужды лаборатории;
3. Необходимость ведения современного учебного процесса, создание современной и инновационной образовательной среды;
4. Активное развитие области мобильной робототехники, включающей разработку сервисных роботов и складских робототехнических комплексов (РТК). Для этих машин основными характеристиками являются повышенная манёвренность и возможность взаимодействия с другими объектами. Для достижения первой характеристики широко используются колёса сложной конструкции, оснащённые резиновыми роликами, что

позволяет избежать создания сложных и трудноуправляемых конструкций. Для реализации второй – манипуляторы.

5. Возможность ручного дистанционного управления с помощью джойстика и автоматического управления, основанного на показаниях лидара и ультразвуковых датчиков;
6. Способность работать в течении получаса, питаясь от блока аккумуляторов и возможность быстрой смены блока;
7. Реализация двух вариантов робота – базового для общего обучения и продвинутого для более ресурсозатратных задач;
8. Наличие платы управления собственной разработки с интегрированным микроконтроллером семейства STM32 для управления периферией. Создание такой платы обусловлено необходимостью объединения множества электронных компонентов, что позволяет сократить количество проводных соединений и повысить надёжность всей системы;
9. Оснащение робота манипулятором с несколькими схватами;
10. Возможность решать задачи технического зрения;
11. Масса робота в пределах трёх килограмм. Это требование обусловлено широким выбором подходящих моторов, возможностью вместить многочисленные компоненты робота без превышения допустимой массы, обеспечением возможности ручной транспортировки и достижения высокой надёжности робота;
12. Габариты робота – 350 х 350 х 700 мм;
13. Образовательный материал и лабораторные работы.

Проектирование комплекса

Этап проектирования включает в себя выполнение сформулированных выше требований, воплощённых в работоспособной модели прототипа робота для образовательного робототехнического комплекса. Решения, выполненные в процессе проектирования:

1. Применение четырёх всенаправленных колёс (omni-колёс) (см. рис. 1) диаметром 82 мм. Преимущество omni-колёс по сравнению с mecanum-колёсами (см. рис. 2) в скоростных характеристиках. Первые могут развивать бóльшую скорость при тех же моторах;

Omni-колесо представляет из себя колесо с небольшими дисками (роликами) расположенными по окружности, перпендикулярными направлению вращения. Смысл такой конструкции заключается в возможности привести колесо в движение с полной силой, которое при этом будет скользить вбок;

Рисунок 1 — Omni-колесо

Mecanum-колесо представляет из себя ряд обрезиненных внешних роликов, установленных на протяжении всей окружности колеса под углом 45° между ними и осью колеса. Возможность перемещаться во все стороны выполняется при помощи изменения направлений и скоростей вращения отдельных колёс.

Рисунок 2 — Mecanum-колесо

В процессе разработки была создана минимальная рабочая версии робота, предназначенная для тестирования системы управления моторами. Для этого произведён расчёт параметров моторов:

$$V = x * V_x + y * V_y + \frac{d\varphi}{dt}$$

где: V – относительное значение скорости робота от минимального до максимального значения $[-1;\ 1]$ (где -1 - движение назад, 1 - движение вперёд, 0 - робот не двигается); V_x, V_y – составляющие скорости V; x – множитель для учёта x составляющей целевой скорости; y – множитель для учёта y составляющей целевой скорости; $\frac{d\varphi}{dt}$ – производная угла поворота;

В дальнейшем, минимальная рабочая версия развилась в более совершенный вариант, позволяющий двигаться автономно. Для реализации автономного движения были выполнены следующие действия:

- Выбор сектора без манипулятора;
- Поиск минимального расстояния в массиве;
- Принятие расстояния для автоматического дистанцирования равного 0,6 м (минимальное значение расстояния для сравнения с данными из массива);
- Поиск всех направлений с минимальным значением расстояния;
- Поиск среднего числа направлений;

Формулы для поиска среднего числа направлений:

$$V_x = cos\big((srd) * 2 * \pi\big)$$

$$V_y = sin\big((srd) * 2 * \pi\ \big)$$

где: srd – среднее число направлений;

2. Выбор моторов постоянного тока с энкодерами JGB37-520 (12V) со скоростью вращения 178 об/мин;
3. Конфигурация с четырьмя omni-колёсами позволяет развивать бóльшую скорость при использовании моторов с одними и теми же значениями оборотов (при движении вдоль осей одной пары колёс и перпендикулярно осям второй пары колёс), в отличии от моделей с тремя omni-колёсами;
4. Корпус мобильной платформы в виде двух дистанцированных друг от друга неправильных восьмиугольников (усечённых четырёхугольников 250 мм на 250 мм), обусловленный расположением omni-колёс для достижения наиболее эффективных скоростных характеристик;
5. Пятизвенный (звено – элемент кинематической цепи) манипулятор (см. рис. 3) [3] с четырьмя различными схватами (электрический жёсткий, пневматический мягкий [4], пневматический жёсткий и вакуумный). Для работы манипулятора произведено решение задач прямой и обратной кинематики:

Прямая задача кинематики – расчёт координат нахождения рабочего органа манипулятора при заданных углах сервоприводов;

Обратная задача кинематики – вычисление углов сервоприводов манипулятора для достижения рабочим органом положения, согласно заданным координатам;

Рисунок 3 — Пятизвенный манипулятор с электрическим жёстким схватом

6. Наличие камер нескольких типов для работы с техническим зрением;
7. Система автоматического движения, включающая в себя лидар (RPLIDAR A1) и ультразвуковой датчик (дальномер HC-SR04) [5];

8. Печатная плата (см. рис. 4), включающая в себя большую часть многочисленных электронных компонентов (драйверы моторов, контроллер широтно-импульсной модуляции (ШИМ-контроллер), микроконтроллер STM32F407VGT6, стабилизаторы напряжения и др.);
9. Реализация двух вариантов робота – базовый (микрокомпьютер – Raspberry Pi 4) и продвинутый (микрокомпьютер – Jetson Nano Orin).

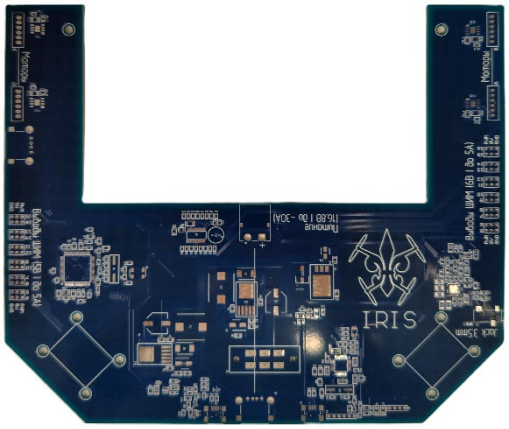


Рисунок 4 — Печатная плата без смонтированных компонентов

Изготовление робота

Этап изготовления робота включает в себя печать элементов корпуса на 3D-принтере – двух главных панелей из пластика, четырёх силиконовых демпферов, предназначенных для гашения колебаний, возникающих при движении (устанавливаются между крепежами моторов и нижней панелью), элементов манипулятора из пластика. Панели дистанцированны друг от друга посредством латунных стоек.

Изготовление печатной платы осуществлялось сторонними подрядчиками, основываясь на проектной документации.

После печати компонентов корпуса и манипулятора, получении печатной платы последовали следующие этапы:

1. Сборка элементов корпуса в единую конструкцию;
2. Сборка манипулятора (пластиковые элементы и сервоприводы);
3. Монтаж SMD-компонентов на печатную плату;
4. Монтаж логических и силовых компонентов (двигателей, печатной платы, микрокомпьютера, лидара, дальномера, манипулятора) на корпус, соединение их в единую логическую и силовую схемы;
5. Установка необходимого программного обеспечения на применяемый микрокомпьютер, программирование микроконтроллер STM32F407VGT6.

Результатом сборки стал прототип робототехнического комплекса с микрокомпьютером Raspberry Pi 4 model B (см. рис. 5).

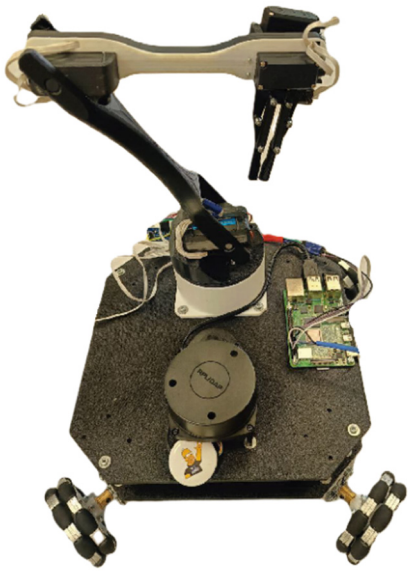


Рисунок 5 — Собранный прототип робототехнического комплекса (базовая модель)

Написание программного обеспечения для комплекса

Этап написания программного обеспечения включает в себя как создание необходимых программ с нуля, так и применение уже существующих пакетов и библиотек (к таким относятся библиотеки для работы с джойстиком и лидаром), установка приложений.

Список программного обеспечения, применяемого в проекте образовательного робототехнического комплекса:

- Операционная система Raspbian 10;
- Фреймворк ROS (Noetic Ninjemys);
- Программное обеспечение для Raspberry Pi:
  - Базовые пакеты (библиотеки);
  - Собранный пакет;
    - Ноды:
      - Вторичная обработка данных лидара;
      - Первичная обработка данных с ультразвукового датчика;
      - Управление сервоприводов для манипулятора;
      - Вторичная обработка данных с джойстика;
    - Сообщения:
      - Сообщение для сервоприводов;
      - Сообщения для данных с джойстика;
    - Дополнительный код:
      - Код вычислений скоростей;
      - Код для обработки данных с энкодеров;
      - Код для работы манипулятора (решение первой и второй задач кинематики);
    - Установленные пакеты (библиотеки);
      - Пакет для подключения джойстика (дистанционное управление и получение данных);
      - Пакет для работы с лидаром (получение данных);
- Программное обеспечение для STM32F407:
  - Получение данных по UART;
  - Передача данных по I2C на периферию.

Написание учебных материалов и лабораторных работ для комплекса

Так как робототехнический комплекс позиционируется как образовательный, была проведена работа по созданию комплекта учебных материалов, включающих в себя теоретическую часть и лабораторные работы с данным программным обеспечением.

Список учебных материалов, применяемых в проекте образовательного робототехнического комплекса:

- Руководство по установке и деинсталляции программного обеспечения.
  - Скачивание необходимого дистрибутива Linux, программы для создания загрузочного носителя;
  - Монтаж установщика на microSD карту;
  - Настройка I2C-портов, скачивание необходимых пакетов и библиотек;
  - Установка ROS;
- Первый запуск;
- Начало работы с Linux;
- Начало работы с ROS;
- Создание своей ноды;
- Работа с манипулятором;
  - Расчёт манипулятора;
  - Решение задач прямой и обратной кинематики;
  - Программирование манипулятора;
- Интерфейсы передачи данных;
- Ручное и автоматическое управление роботом;
- Управление движением робота при помощи джойстика;
- Управление моторами и движением робота;
- Передача данных через интерфейсы UART и I2C.

Тестирование прототипа робота

Этап тестирования прототипа включает в себя:

1. Опытную эксплуатацию отдельных узлов и компонентов робота (получение данных с лидара и дальномера, управление моторами, манипулятором);
2. Опытную эксплуатацию всего комплекса (испытание ручного и автоматического управления, точности позиционирования схвата манипулятора);

3. Проверку работоспособности программного обеспечения (правильное функционирование отдельных программ и пакетов, корректную передачу данных между программами и обработка информации);
4. Обнаружение ошибок в учебном материале;
5. Внесение коррективов в конструкцию и программную часть, отладку и калибровку компонентов.

В процессе тестирования, проведено устранение недостатков (детских болезней) и неполадок, заложенных на этапе проектирования и не выявленных на этапах изготовления и сборки, написания учебных материалов. Результатом является прототип образовательного роботехнического комплекса, лишённый конструкционных недостатков, ошибок в коде и в учебных материалах.

Вывод

Результатом разработки образовательного робота стало создание сложного технического продукта, удовлетворяющего сформулированным требованиям и являющегося частью образовательного робототехнического комплекса для студентов.

Итоговый вариант созданного комплекса соответствует всем поставленным задачам. Помимо самого робота было разработано программное обеспечение, создан курс учебных материалов и лабораторных работ. Проведено всестороннее тестирование разработанных элементов, выявлены и устранены недостатки.

В заключение, процесс разработки и последующего внедрения образовательного робототехнического комплекса в учебный процесс является важным шагом на пути к созданию современной и инновационной образовательной среды, направленной на подготовку высококвалифицированных специалистов.

Литература

1. Робот TurtleBro: [сайт]. – Москва, 2015 – URL: https://voltbro.ru/turtlebro. – Текст: электронный.
2. Робот ROSMASTER X3 PLUS: [сайт]. – Шэньчжэнь, 2015 – URL: https://category.yahboom.net/products/rosmaster-x3-plus. - Текст: электронный.
3. Zhilenkov, A. A. Designing of sensoreless control system for brushless direct current motor / A. A. Zhilenkov, D. Denk // Proceedings of the 2017 IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference, ElConRus 2017, St. Petersburg, 01–03 февраля 2017 года. – St. Petersburg, 2017. – P. 1104-1108. – DOI 10.1109/EIConRus.2017.7910748. – EDN PRMIVB.
4. Лебедева Е.В., Жиленков А.А., Проектирование и разработка системы мягкого схвата на основе пневмопривода и гибких эластомеров / Лебедева Е.В., Жиленков А.А. // Известия Тульского Государственного Университета. Технические науки. сб. науч. тр. / ТулГУ – Тула, 2024 – Вып. 7. – С. 420. – DOI: 10.24412/2071-6168-2024-7-420-421.
5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023680366 Российская Федерация. Программа моделирования эволюции механической системы на базе геометрического интегратора: № 2023668842: заявл. 14.09.2023: опубл. 28.09.2023 / А. А. Жиленков, И. М. Портнов, А. А. Медведева, И. С. Моисеев; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет». – EDN LCMKZX.

Информация об авторах

Лебедева Екатерина Владиславовна, лаборант-исследователь, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет (СПБГМТУ), Россия, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, д. 3, katalebedeva-2017@mail.ru

Ложкин Владислав Александрович лаборант-исследователь, СПБГМТУ, С Россия, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, д. 3, vlad@lozhkin.su

Моисеенко Максим Сергеевич, лаборант-исследователь, СПБГМТУ, С Россия, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, д. 3, straniychelovek@gmail.com

Многофункциональный лабораторный стенд для исследования сенсорных и управляющих систем роботов

В.П. Андреев✉, В.В. Майоров
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН» (ФГБОУ ВО МГТУ «СТАНКИН»), Москва, Россия, andreevvipa@yandex.ru

Аннотация
Описан многофункциональный лабораторный стенд, предназначенный для проведения лабораторных работ и исследований в области сенсорных систем роботов и систем управления мехатронными устройствами. Стенд представляет собой массивное деревянное основание, на котором размещены линейный привод и блок управления с электронными и электромеханическими компонентами. Конструкция стенда позволяет создавать различные варианты их взаимодействия. Стенд даёт возможность изучить на практике использование в системе управления роботов таких датчиков, как ультразвуковой и инфракрасный датчики расстояния, концевой датчик на герконе и на основе эффекта Холла, датчик тока, оптический одометр и одометр на эффекте Холла (все компоненты входят в состав стенда). В системе управления стенда используется микроконтроллер, с помощью которого можно создавать различное программное обеспечение для управления через имеющийся в составе стенда драйвер шаговым двигателем, сервоприводом и линейным приводом с двигателем постоянного тока.

Ключевые слова
Образовательная робототехника, мехатронное устройство, система управления, микроконтроллер, датчик расстояния, сервопривод, шаговый двигатель, двигатель постоянного тока.

Благодарности
Работа выполнена при поддержке Международного учебно-научного центра перспективных медиа-технологий Российского государственного гуманитарного университета.

A versatile laboratory stand for studying sensor and control systems in robots

Viktor P. Andreev✉, Vladislav V. Maiorov
Moscow State University of Technology «STANKIN» (MSUT «STANKIN»), Moscow, Russia, andreevvipa@yandex.ru

Abstract
A versatile laboratory stand designed for laboratory work and research in the field of robot sensor systems and mechatronic devices control systems is described. The stand is a massive wooden base on which a linear actuator and a control unit with electronic and electromechanical components are placed. The design of the stand allows to create various options for their interaction. The stand provides an opportunity to study in practice the use of sensors such as ultrasonic and infrared distance sensors in the robot control system, a reed switch-based and Hall effect-based end sensor, a current sensor, an optical odometer and a Hall effect odometer (all components are part of the stand). The control system of the stand uses a microcontroller, which allows to create various control software for a stepper motor, a servo drive and a linear actuator with a DC motor through the driver available in the stand.

Key words
Educational robotics, mechatronic device, control system, microcontroller, distance sensor, servo drive, stepper motor, DC motor.

Acknowledgements
The work was accomplished with the support of the International Educational and Scientific Center for Advanced Media Technologies of the Russian State University for the Humanities.

Цель работы

В процессе обучения студентов и школьников в области робототехники требуется на практике познакомить обучающихся с оборудованием, входящим в состав робототехнических устройств. Необходимо также дать им практические навыки работы с различными датчиками, обычно входящими в сенсорную систему как промышленных, так и мобильных сервисных роботов. Особую значимость приобретает обучение программированию микроконтроллеров с целью организации программного управления различными внешними устрой-

ствами – индикаторами, реле, приводами. Существующие наборы оборудования [1, 2, 3], как правило, представляют собой разнообразные электронные и электромеханические компоненты, которые учащимся необходимо самостоятельно во время занятий собирать в отдельные устройства для изучения их работы в комплексе. Поэтому возникает необходимость в готовых решениях, конструктивно объединяющих в себе механические, электромеханические, электронные и программные компоненты, взаимодействие которых требуется организовать. Представляется, что это должен быть многофункциональный мехатронный стенд для проведения лабораторных работ по исследованию сенсорных и управляющих систем роботов.

Целью данной работы является создание лабораторного стенда, обеспечивающего проведение практических занятий по изучению сенсорных и управляющих систем роботов студентами ВУЗов соответствующих специальностей и учащимися школ при организации дополнительного школьного образования в области интеллектуальной роботроники [4].

Существующие решения

В статье [1] рассматривается «концепция лабораторного стенда для изучения робототехнических датчиков, предназначенного для студентов первых курсов по специальностям, связанным с робототехникой». В работе рассмотрена лишь концепция, которая ограничена исследованием только датчиков, не предоставляя возможности изучения полного цикла управления мехатронным устройством.

В методическом пособии [2] для изучения работы мехатронных устройств роботов применяется установка на базе модуля РАУ-107А. Данный модуль представляет собой рулевое автоматическое устройство, включающее в себя двигатель постоянного тока и механическую передачу движения типа винт–гайка, которая преобразует угол поворота двигателя в линейное перемещение штока. Помимо РАУ-107А в установку входят потенциометрический датчик обратной связи и цифровой датчик положения. Однако отсутствуют микроконтроллер для реализации управляющих программ, дистанционные датчики расстояния, концевые датчики положения и т.п. Такая установка не позволяет реализовать в лабораторной работе программное управление мехатроным устройством без привлечения дополнительного оборудования и комплектующих.

В пособии [3] обращает на себя внимание постановка 2-х лабораторных работ – «Ультразвуковые датчики приближения» и «Применение микроконтроллера для обработки информации, поступающей от датчиков». В первом примере исследуется работа промышленного УЗ-дальномера Teile-Nr.376-104, при этом все механические компоненты установки перемещаются вручную. Во втором примере, в процессе лабораторной работы выполняется сборка мобильной платформы, оснащаемой различным оборудованием (в том числе микроконтроллером Arduino, датчиком света и УЗ-датчиком на поворотной платформе). То есть, это обычный робототехнический конструктор мобильных роботов для школьников, множество которых представлено на рынке.

Приведённые работы не позволяют комплексно изучить работу систем управления – исследовать функционал и параметры различных датчиков, например, выполнить их калибровку, научиться создавать для микроконтроллеров программное обеспечение (ПО) для управления приводами разного типа, исследовать варианты организации управления по показаниям датчиков и т.п.

Предлагаемое решение

Для проведения лабораторных работ и исследований [5] в области сенсорных систем и управления мехатронными устройствами создан многофункциональный лабораторный стенд (см. рис. 1).

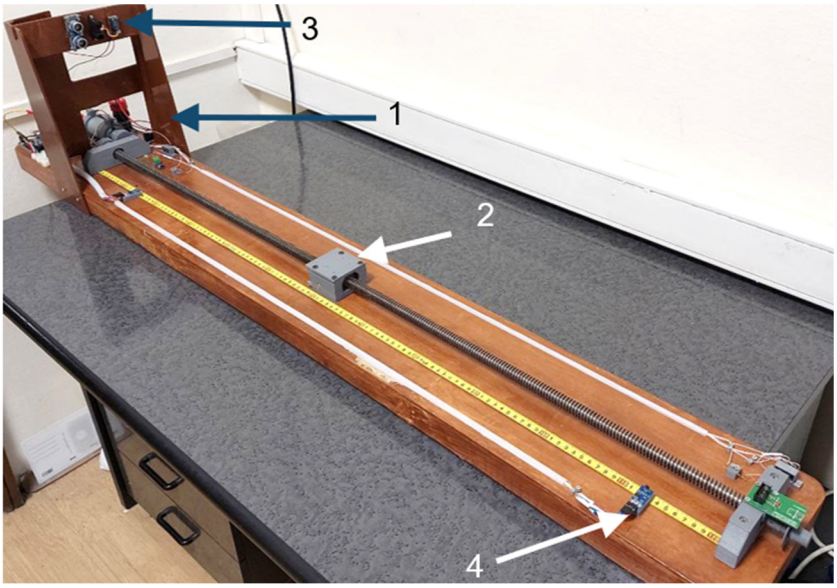


Рисунок 1 — Многофункциональный лабораторный стенд

Стенд представляет собой массивное деревянное основание размером 1500x200x40 мм, на котором размещены механические, электромеханические и электронные компоненты. Конструкция стенда позволяет обучающемуся создавать различные варианты их взаимодействия.

Стенд состоит из нескольких основных блоков: 1 – блок управления, 2 – линейный привод с кареткой, 3 – съёмные планки с различной оснасткой, 4 – концевые датчики.

В блок управления стенда (см. рис. 2) входят: 1 – микроконтроллер (МК) Arduino, с помощью которого можно создавать различные программы управления всеми компонентами, 2 – беспаечная макетная плата, используемая для подключения внешних устройств к микроконтроллеру и сборки различных схем управления. В этой же части стенда располагается 3 – двигатель постоянного тока с энкодером, 4 – датчик тока и 5 – драйвер двигателя.

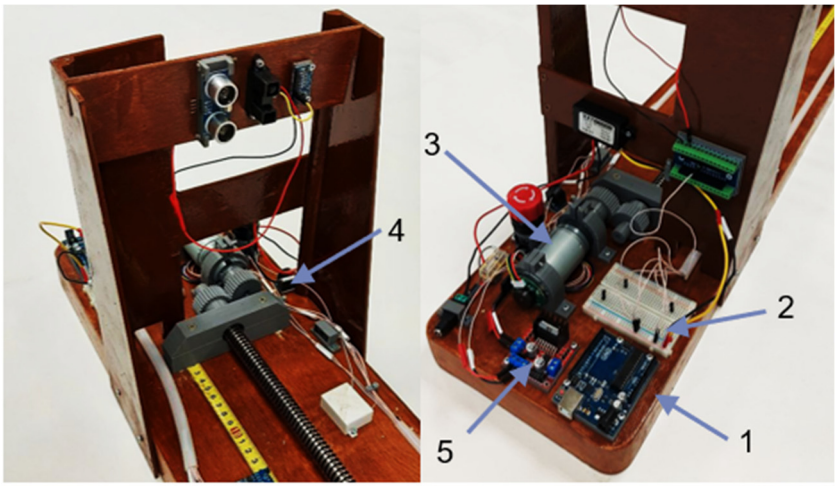


Рисунок 2 — Блок управления стенда

Основой стенда является линейный привод (см. рис. 3). На массивном деревянном основании 1 установлены две стойки 2, на которые с помощью подшипников установлен трапецеидальный ходовой винт 3 длиной 120 см.

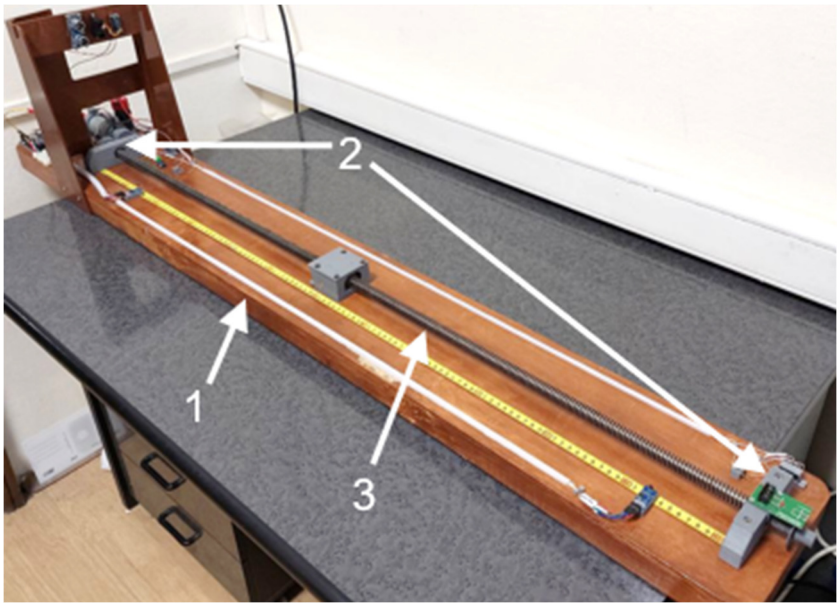


Рисунок 3 — Линейный привод

Подвижным объектом является каретка 2 (см. рис. 4), установленная на гайку 1 на ходовом винте. Каретка состоит из двух частей – основания и дна, что позволяет легко снимать её с гайки. Конструкция каретки позволяет закреплять на ней различные объекты – плоское препятствие из разных материалов или иной объект сложной формы. Это даёт возможность исследовать работу дистанционных датчиков и выполнять их калибровку. По двум сторонам в основании каретки установлены магниты 3, предназначенные для работы с концевыми датчиками на герконах и эффекте Холла, которые закреплены на основании стенда у концов ходового

винта. Каретка имеет особую форму – скос на одной из сторон, который необходим для того, чтобы исключить влияние корпуса каретки на показания ультразвуковых дальномеров.

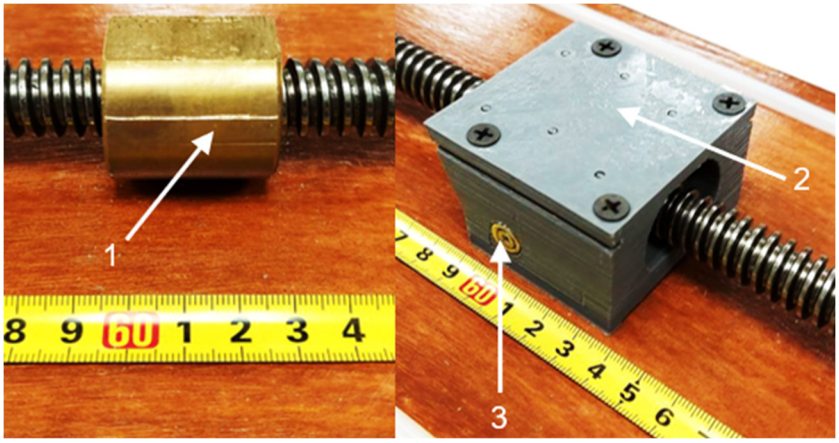


Рисунок 4 — Подвижный объект (каретка) на ходовом винте

Ходовая часть (см. рис. 5) приводится в движение двигателем постоянного тока 1 (ДПТ), соединённым с ходовым винтом посредством зубчатой передачи 2. При необходимости, изменяя передаточное отношение, можно регулировать максимальную скорость движения каретки, установленной на гайке. В конструкции двигателя имеется энкодер 3 на эффекте Холла для определения положения вала, что позволяет организовать управление двигателем по скорости от микропроцессора. В цепь электропитания ДПТ установлен датчик тока (см. рис. 2), с помощью которого можно исследовать методы управления приводом по моменту. Помимо этого, на стенде установлен оптический одометр 4 для определения скорости вращения выходного звена линейного привода. Наличие двух функционально одинаковых датчиков, один из которых установлен на оси ДПТ, а другой – на ходовом винте, позволяет исследовать зависимость параметров управления двигателем по обратной связи от точности используемого энкодера (одометра).

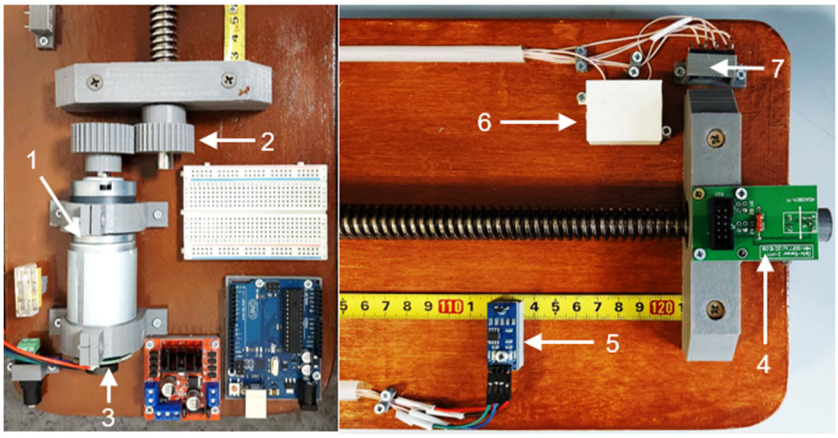


Рисунок 5 — Ходовая часть и проприоцептивные датчики

В крайних положениях линейного привода расположены концевые датчики двух типов (см. рис. 5). Концевые датчики на эффекте Холла 5 программируются обучающимся при организации управления двигателем линейного привода от микроконтроллера. Вторая пара концевых датчиков 6 (на герконах) входит в конструкцию контура безопасности – для исключения выхода из строя привода в случае ошибочного алгоритма управляющих программ, когда подвижный элемент (каретка) может выйти за пределы предусмотренной рабочей зоны. При достижении кареткой с магнитами предельных положений срабатывают концевые датчики на герконах, и контур управления по питанию ДПТ размыкается через реле 7.

Дополнительные элементы управления и контроля расположены на отдельных съёмных планках (см. рис. 6), которые легко устанавливаются в конструктив стенда.

Для изучения способов управления различными типами двигателей на первую съёмную планку (см. рис. 7) установлены сервопривод, шаговый двигатель и драйвер шагового двигателя.

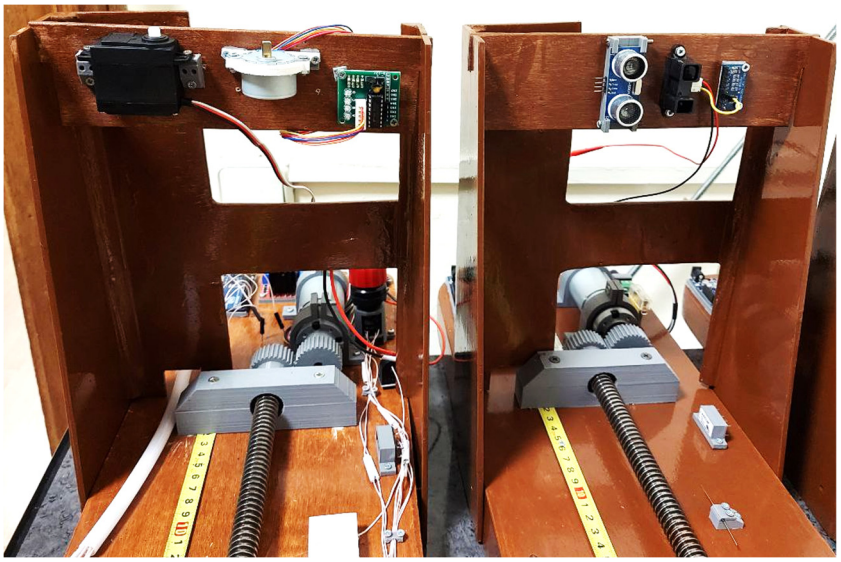


Рисунок 6 — Два варианта установки съёмных планок – с двигателями и датчиками расстояния

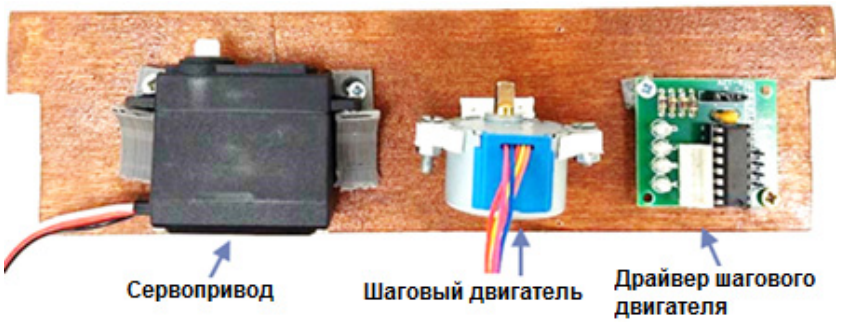


Рисунок 7 — Съёмная планка с различными типами двигателей

На вторую съёмную планку (см. рис. 8) установлены УЗ- и ИК-датчики расстояния (HC-SR04 и Sharp GP2Y0A02YK0F). На этой планке также установлен внешний АЦП ADS1510, используемый для преобразования аналогового сигнала ИК-датчика расстояния в цифровой код, что позволяет проводить исследования по сопоставлению помехоустойчивости аналоговых и цифровых каналов передачи данных. Эти дальномеры используются для определения дальности до объекта, установленного на подвижной каретке.

Рисунок 8 — Съёмная планка с УЗ- и ИК- датчиками расстояния

В состав стенда входит микроконтроллер Arduino Uno, для которого можно создавать ПО для съёма показаний различных концевых и дистанционных датчиков, а также для управления через имеющийся драйвер двигателем постоянного тока, шаговым двигателем, сервоприводом и линейным приводом. Микроконтроллер Arduino Uno может быть подключён по коммуникационному каналу USB к внешнему компьютеру, например, с целью реализации сложного алгоритма управления компонентами стенда. Установленный в стенд микроконтроллер может быть заменён на любой другой, подходящий по своим параметрам.

Все крепёжные компоненты (стойки подшипников, крепежи датчиков и устройств, каретка и др.) изготовлены с использованием технологий 3D-печати. Это позволяет, при необходимости, легко заменить повреждённые компоненты или модифицировать стенд. Трёхмерные модели компонентов и самого стенда прилагаются в комплекте опционно.

Практическое применение

Настоящий многофункциональный лабораторный стенд используется для проведения лабораторных работ по курсу «Сенсорные и управляющие системы роботов» на кафедре робототехники и мехатроники Московского государственного технологического университета "СТАНКИН". В соответствии с [4] разработаны методические материалы для проведения практических работ по темам:

1. Управление внешними устройствами от микроконтроллера – индикаторными светодиодами, электромагнитным реле, сервоприводом, шаговым двигателем и двигателем постоянного тока.
2. Разработка и реализация программы автоматической калибровки УЗ- и ИК- датчиков расстояния с использованием линейного привода, оснащённого концевыми датчиками и одометрами 2-х типов.

Литература

1. Осипова П., Антипин М. Е. Концепция лабораторного стенда для изучения робототехнических датчиков // Журнал «Научный лидер», 2020. №2 (2). URL: https://scilead.ru/article/36-kontseptsiya-laboratornogo-stenda-dlya-izucheni (дата обращения 31.08.2024г.)
2. Мехатронные устройства роботов [Электронный ресурс] : метод. рек. к лаб. работам для студентов / сост. А. С. Коваль. - Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2018. - 35с. – Режим доступа: http://e.biblio.bru.by/handle/1212121212/6779 (дата обращения 31.08.2024 г.)
3. Датчики в мехатронных и робототехнических системах. Лабораторные работы по курсу «Первичные преобразователи информации» образовательной программы 15.04.06 Мехатроника и робототехника: практикум / сост. А.С. Губанков, И.В. Горностаев [Электронный ресурс] / Инженерная школа ДВФУ. – Электрон. дан. – Владивосток: Дальневост. федерал. ун-т, 2015. – [39 с.]. – Acrobat Reader, Foxit Reader либо любой другой их аналог. – Режим доступа: http://www.dvfu.ru/schools/engineering/science/scientific-and-educational-publications/manuals/ (дата обращения 31.08.2024г.)
4. Андреев В.П., Ким В.Л., Кувшинов С.В. и др. Интеллектуальная роботроника. Проектно-исследовательская деятельность учащихся и студентов с использованием модульных коллаборативных робототехнических систем: учебно-методическое пособие для организации дополнительного образования: для профильных инженерных классов общеобразовательных организаций и вузов г. Москвы // Российский государственный гуманитарный университет, Департамент образования и науки г. Москвы, Центр технологической поддержки образования. Москва. – М.: Изд-во «ОнтоПринт», 2020. – 424с.
5. Андреев В.П., Майоров В.В. Метод повышения разрешающей способности ультразвуковой сенсорной системы роботов / ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ РОБОТОТЕХНИКА. Труды 34-й Международной научно-технической конференции «ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ РОБОТОТЕХНИКА», 23-24 ноября 2023 г. ISSN 2658-7645. – Санкт-Петербург: Изд-во: ЦНИИ РТК, 2023. – С. 57-64.

Информация об авторах

Андреев Виктор Павлович, д.т.н., профессор кафедры сенсорных и управляющих систем, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН» (ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»), Россия, 127994, Москва, ГСП-4, Вадковский пер., д. 1, andreevvipa@yandex.ru

Майоров Владислав Васильевич, студент (магистратура), ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», Россия, 127994, Москва, ГСП-4, Вадковский пер., д. 1, majorow.w@yandex.ru

От фабрики-конструктора к реальному производству: комплексное обучение робототехнике для школьников

О.Б. Сенацкая✉, М.В. Загорин
Самарский университет, г. Самара, Россия, olgasenatskaya@gmail.com

Аннотация
Статья посвящена профориентационной работе со школьниками и студентами младших курсов в области робототехники и цифрового моделирования в рамках образовательной программы Передовой инженерной аэрокосмической школы (ПИАШ) Самарского университета. Представлены методы и подходы, используемые для обучения учащихся основам программирования контроллеров, созданию цифровых моделей производственных процессов и программированию роботов. Особое внимание уделено интеграции учебных задач с практическими примерами на базе фабрики-конструктора Fishertechnik, программного обеспечения R-Pro и роботизированной ячейки от компании Technored. В статье рассмотрены примеры учебных заданий, используемых в ходе занятий и приведены результаты работы учащихся.

Ключевые слова
Цифровое моделирование, фабрика-конструктор, робот-манипулятор, программирование, обучение школьников, производство.

Благодарности
Проект осуществляется за счёт средств грантов в форме субсидий из федерального бюджета, выделенных на поддержку программ развития передовых инженерных школ, в рамках реализации федерального проекта «Передовые инженерные школы» государственной программы Российской Федерации «Научно-технологическое развитие Российской Федерации» на 2024 год». Работа выполнена под руководством доцентов Федотова Ю.А. и Кокаревой В.В. в рамках проекта «Разработка и создание малоразмерных аэрокосмических двигателей» в рамках реализации Программы развития передовой инженерной школы федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» на 2022-2030 годы.

From educational model to real production: comprehensive robotics training for school students

Olga B. Senatskaya✉, Mihail V. Zagorin
Samara University, Samara, Russia, olgasenatskaya@gmail.com

Abstract
The article focuses on career guidance activities with high school students in the fields of robotics and digital modeling within the educational program of the Advanced Engineering Aerospace School at Samara University. The methods and approaches used to teach students the basics of controller programming, creating digital models of production processes, and robot programming are presented. Special attention is given to the integration of educational tasks with practical examples based on the Fishertechnik factory model, R-Pro software, and the robotic cell from Technored. The article discusses examples of educational tasks used during the lessons and provides the results of students' work.

Key words
Digital modeling, factory constructor, robotic manipulator, programming, student training, manufacturing.

Acknowledgements
The project is funded by grants in the form of subsidies from the federal budget, allocated to support development programs for advanced engineering schools, as part of the federal project «Advanced Engineering Schools» of the state program of the Russian Federation «Scientific and Technological Development of the Russian Federation" for the year 2024. The work was carried out under the supervision of associate professors Yu.A. Fedotov and V.V. Kokareva within the framework of the project «Development and Creation of Small Aerospace Engines» as part of the implementation of the Development Program for the Advanced Engineering School of the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev» for 2022-2030.

Введение

Одной из обязательных частей обучения в Передовой инженерной аэрокосмической школе (ПИАШ) Самарского университета является образовательная работа со школьниками. Мы занимаемся обучением в областях робототехники и цифрового моделирования. Цель работы – дать учащимся старших классов базовые навыки в данных направлениях и вдохновить их на дальнейшее развитие в инженерных профессиях.

Занятия рассчитаны на старшеклассников (9-11 класс) и включают обучение программированию контроллеров на графическом языке и работу в программном комплексе R-Pro [1], где создаются цифровые модели производственных процессов с использованием роботизации. Для школьников помладше предусмотрены демонстрационные занятия. Следует подчеркнуть, что робототехнику и программирование роботов невозможно рассматривать в отрыве от общего производственного процесса. Цифровое моделирование в R-Pro позволяет смоделировать множество технологических процессов, встречающихся на реальных предприятиях (механическая обработка, складирование, сборка изделий и т.д.) и подобрать для них оптимальные средства роботизации и автоматизации. Программный комплекс также предоставляет возможность прописывать программы движения роботов и выгружать их через постпроцессор на физическое оборудование.

Фабрика-конструктор как инструмент обучения

Для ребят, которые не имели опыта с реальными производственными объектами, в лаборатории ПИАШ имеется фабрика-конструктор от компании Fischertechnik [2] (см. рис. 1). Она отображает небольшое производство, включая сканирование, складирование, сортировку и имитацию термической и механической обработки трёх типов деталей. Управление модулями фабрики осуществляется с помощью программируемого логического контроллера.

Работая с этой моделью, учащиеся не только знакомятся с логикой работы системы, но и узнают о применении различных типов датчиков, приводов и исполнительных механизмов. Такой подход помогает лучше понять принципы управления технологическими процессами и освоить основы работы с ПЛК, что создает прочную базу для дальнейшего изучения автоматизации и робототехники.

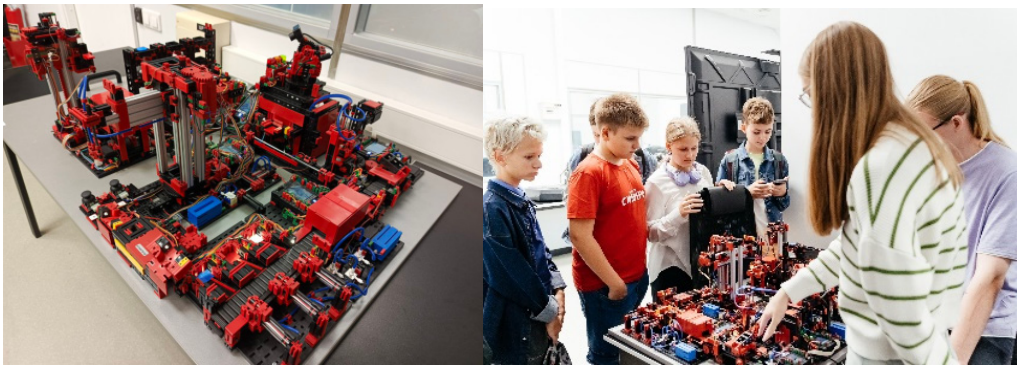


Рисунок 1 — Фабрика-конструктор Fischertechnik

Цифровое моделирование

После ознакомления с физической моделью фабрики школьники переходят к созданию цифровой модели в программе R-Pro. На первом уроке они знакомятся с интерфейсом программы на примере создания упрощенной модели фабрики-конструктора. Учащиеся рассматривают доступные элементы в каталоге оборудования, строят свою первую планировку производственного участка и учатся выстраивать технологические процессы. В каталоге размещены разные виды оборудования (конвейеры, станки, 3D-принтеры, роботы, склады и др.), каждый из которых имеет настраиваемые свойства. Например, для склада можно изменить габариты, количество ячеек, способ загрузки и другие ключевые параметры, что позволяет настроить используемое оборудование под свои задачи.

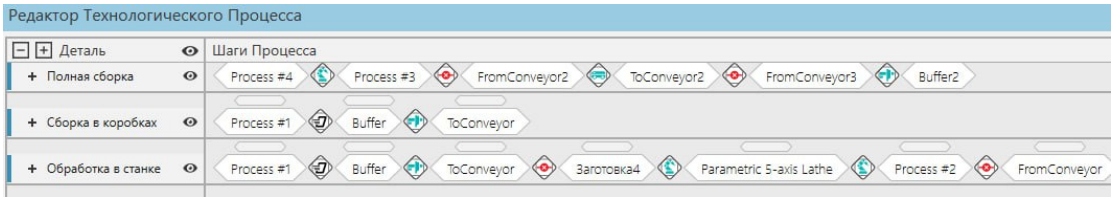


Рисунок 2 — Пример написания технологического процесса

Панель Редактора технологического процесса (см. рис. 2) позволяет добавлять и редактировать последовательности процессов, связанные с группами процессов. Шаг процесса – это точка на рабочем пространстве программы (например, станок), внутри которой выполняется последовательность выражений, определяющая

логику работы данного шага. В используемом школьниками оборудовании, выражения прописаны заранее и не требуют изменений. Группы процессов включают в себя детали или сборочные изделия, которые мы заранее добавляем в систему. Когда мы создаём маршрут потока, то задаём порядок выполнения шагов для каждой группы процессов, а также указываем, какое средство будет использоваться для транспортировки изделий между шагами – это может быть кран-штабелер, робот-манипулятор, мобильный робот, человек и др.

Основным средством перемещения деталей на фабрике является робот, поэтому на следующем этапе учащиеся знакомятся с программированием роботов-манипуляторов и их ключевыми характеристиками, такими как область досягаемости, количество звеньев и грузоподъемность. Одной из задач для учеников является выбор подходящего робота из каталога для выполнения конкретной операции на фабрике. В процессе программирования учащиеся осваивают различные типы перемещений: линейные, по траектории, по точкам. Программа предоставляет возможности подключения к роботу внешних устройств и работу с сигналами, поэтому школьники знакомятся с разными типами захватов, областью их применения и настройке рабочего инструмента робота в программе.

Учащиеся осваивают такие функции, как создание циклов, управление скоростью и ускорением движения, настройка условий для выполнения задач (например, ожидание сигнала от датчиков) и настройка системы обнаружения столкновений. Включение детектора столкновений позволяет обнаружить первое столкновение и остановить выполнение программы робота, либо обнаружить и вывести список всех столкновений в программе. Эти функции позволяют учащимся проверять корректность написанных программ, своевременно выявлять ошибки и исправлять логику работы робота, что способствует более глубокому пониманию процессов программирования и отладки.

После ознакомления с базовым функционалом программы учащиеся под руководством преподавателя разбирают моделирование типовых технологических процессов. В их числе – складирование с использованием крана-штабелера, роботизированная загрузка станка и сборка изделий, сортировка, упаковка и паллетирование.

По завершении части курса по цифровому моделированию учащиеся создают рабочую модель цеха, состоящую из описанных выше участков (см. рис. 3), и анализируют её с помощью встроенных программных инструментов. Это позволяет оценить производительность системы, загруженность роботов и время выполнения операций, а также выявить возможные узкие места и оптимизировать производственные процессы.

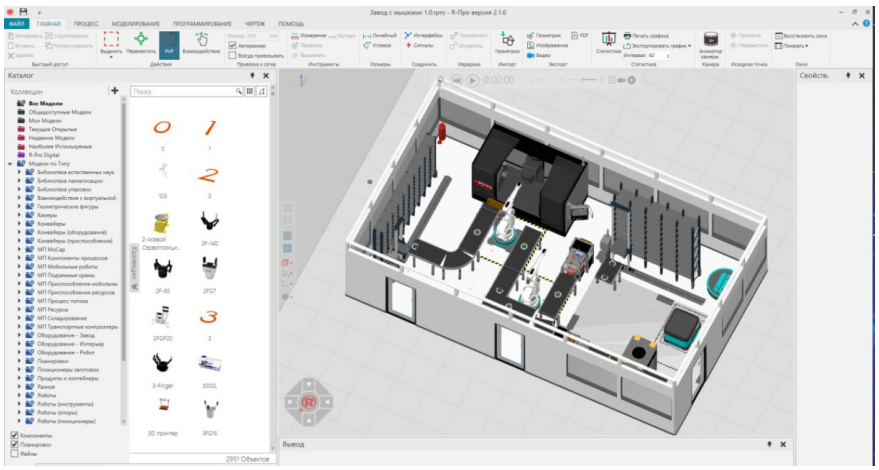


Рисунок 3 — Модель цеха, созданная школьниками в результате освоения модуля по цифровому моделированию

Обучение программированию контроллеров

Обучение программированию контроллеров в среде RoboPro играет ключевую роль в формировании у школьников навыков алгоритмизации и работы с автоматизированными системами. Программа включает пять уровней сложности, что позволяет поэтапно углубляться в изучение, начиная от простых алгоритмов и переходя к более сложным процессам автоматизации.

На начальном уровне школьники осваивают работу с дискретными сигналами, что помогает понять логику работы исполнительных устройств по простым правилам. Как пример, задание может заключаться в управлении освещением в зависимости от нажатия кнопок, или в создании программы, которая управляет мотором на основе входных сигналов от концевых выключателей. Далее учащиеся переходят к написанию более сложных алгоритмов, включая циклы (см. рис. 4), работу с логическими и арифметическими операторами, аналоговые сигналы и управление моторами.

В среде RoboPro предусмотрена возможность работы в режиме "Онлайн", что позволяет следить за выполнением программы в реальном времени на экране компьютера. Это упрощает процесс отладки и визуализации работы контроллера. Кроме того, есть функции рисования, которые позволяют создавать пользовательские интерфейсы для программ. С их помощью можно добавлять кнопки, текстовые дисплеи и динамические фигуры, что делает интерфейсы более наглядными и удобными для использования (см. рис. 5).

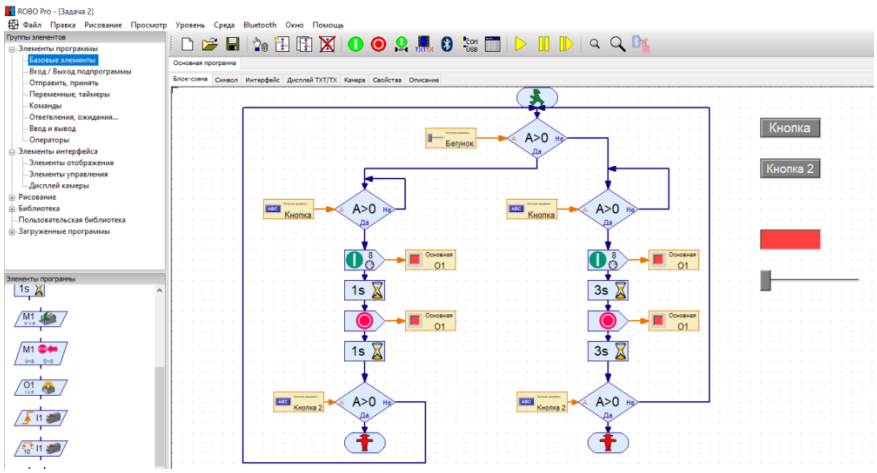


Рисунок 4 — Пример алгоритма, описывающий два режима работы лампочки в зависимости от состояния выключателей

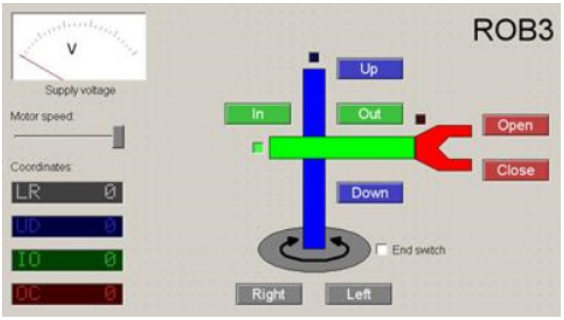


Рисунок 5 — Пример создания пользовательского интерфейса

Одним из важных аспектов, доступных школьникам в программе, является использование технического зрения. Подключение видеокамеры позволяет ученикам решать задачи по распознаванию объектов, линий и цветов. Например, можно разработать алгоритм сортировки объектов по цвету, что отражает реальную задачу на производстве, где роботы сортируют детали по разным критериям. Еще один пример – следование робота по линии, где камера распознает линию, а контроллер управляет движением робота, корректируя его траекторию в зависимости от получаемого изображения. Это возможность познакомиться с базовыми принципами роботизации: восприятие окружающей среды, обработка данных и принятие решений на основе входной информации.

Программирование в RoboPro основано на принципах построения блок-схем, что упрощает процесс понимания алгоритмов. Это помогает школьникам легко перейти к изучению программирования на более сложных языках, таких как Python или C++, а также языках, используемых в промышленной автоматизации и робототехнике.

Будущие перспективы

В продолжении данного курса планируется использование роботизированной ячейки от компании Technored. Ячейка предназначена как для учебных целей, так и для решения реальных производственных задач. Для обучения будут использоваться специальные модули с простыми заготовками (цилиндры, шестиугольные призмы, кубики), имитация пневматического патрона и камера технического зрения. Кроме того, робот будет интегрирован с фрезерным станком для отработки учащимися задач по загрузке и выгрузке заготовок.

Роботизированная ячейка поддерживает популярные языки программирования, такие как C, C++, Lua и Python. Основной акцент в программировании робота будет сделан на языки Lua и Python, так как они позволяют легко осваивать основы робототехники даже начинающим программистам.

Камера технического зрения, подключенная к роботу, будет использоваться для решения таких задач, как определение типов деталей, подсчет их количества и определение ячейки, в которой они расположены. Также с её помощью будут отрабатываться навыки по чтению QR-кодов и меток для автоматической идентификации деталей, что значительно упрощает организацию производственных процессов и мониторинг состояния продукции.

На данный момент в R-Pro разработана модель, включающая роботизированную ячейку с роботом REDS 20 и фрезерный обрабатывающий центр IRONMAC IMU-5X 300, используемый на территории Самарского университета. После разработки постпроцессора для данной модели робота планируется использовать возможность выгрузки программ из R-pro на физическое оборудование, что позволит школьникам увидеть результаты их оффлайн-программирования.

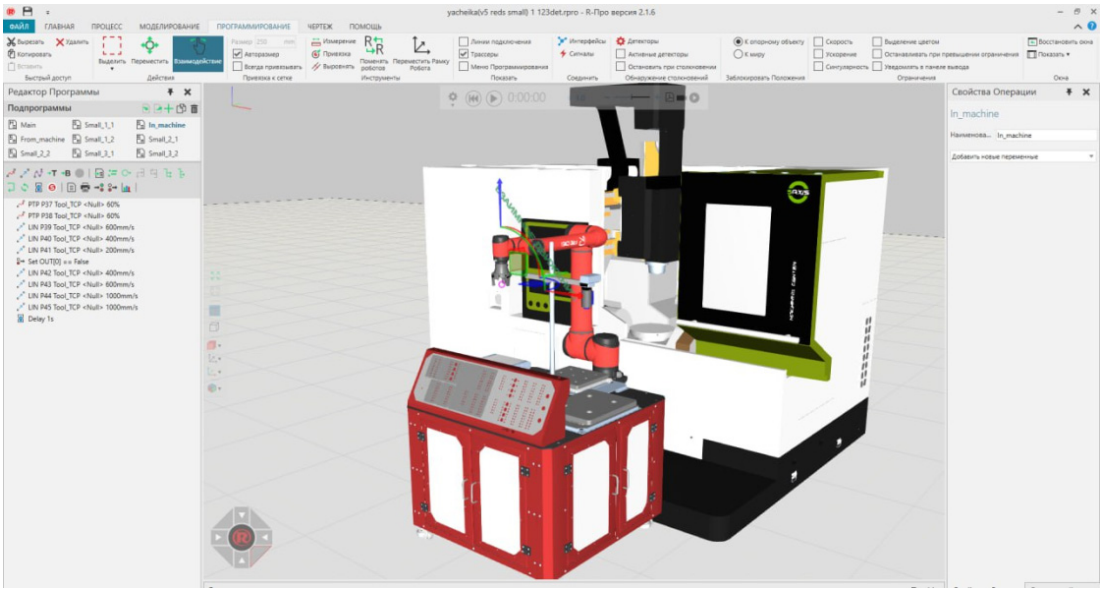


Рисунок 6 — Модель, включающая роботизированную ячейку с роботом и фрезерный обрабатывающий центр

Особенности восприятия школьниками различных разделов курса

На основании нашего опыта, часть курса, посвященная программированию ПЛК, не вызывает трудностей освоения у школьников. Это объясняется постепенным повышением сложности и доступным для понимания графическим языком программирования. При составлении банка задач, помимо основных заданий, которые необходимо было выполнить в течение двухчасового занятия, предусматривались также задачи "со звездочкой" для более продвинутых учеников. Как правило, в группе из 12 человек около 3 учащихся успешно справлялись с выполнением усложненных задач.

В разделе, посвященном цифровому моделированию, из-за более высокого уровня сложности занятия проводились в формате мастер-класса. Преподаватель демонстрировал порядок создания модели на экране, что особенно помогало на первых уроках при освоении программы. Во время занятий школьникам предлагалось после совместно выполненного примера (например, по добавлению типа детали из каталога, назначению ей размеров и материала, а также включению её в определенную группу процессов) самостоятельно выполнить аналогичную последовательность действий, с чем они успешно справлялись. Основные трудности при цифровом моделировании возникали на этапе самостоятельного построения технологического процесса. Это было связано с недостаточным опытом работы в программе (например, учащиеся могли соединить шаги процесса на рабочем пространстве, но забыть продублировать их в редакторе технологического процесса, что вызывало ошибки при симуляции) и отсутствием понимания, что различные детали находятся в разных группах процессов, что приводило к нарушению логики работы программы.

Заключение

Работа по профориентации и обучению старшеклассников даёт им возможность познакомиться с современными технологиями робототехники и цифрового моделирования. Эти знания позволяют не только лучше понять производственные процессы, но и развивают навыки, необходимые для успешной работы в индустрии будущего.

Литература

1. R-Pro Digital [Electronic resource]. URL: https://r-pro.digital/ (дата обращения: 10.10.2024).
2. Fischertechnik Training factory Industry 4.0 V2 [Electronic resource]. URL: Lernfabrik_TXT_40_9VENgb.pdf (дата обращения: 15.10.2024).

Информация об авторах

Сенацкая Ольга Борисовна, магистрант, лаборант-исследователь, Самарский университет, Россия, 443086, г. Самара, Московское шоссе, д. 34, olgasenatskaya@gmail.com

Загорин Михаил Валерьевич, магистрант, лаборант-исследователь, Самарский университет, Россия, 443086, г. Самара, Московское шоссе, д. 34, misha.zagorin@gmail.com

Подготовка и проведение робототехнической олимпиады в виртуальной среде

А.Ю. Овсянников✉, И.А. Статкевич, А.В. Малолетов
Автономная некоммерческая организация высшего образования «Университет Иннополис» (АНО ВО «Университет Иннополис»), г. Иннополис, Республика Татарстан, Россия, a.ovsyannikov@innopolis.ru

Аннотация
В статье исследуется виртуальная среда и возможности виртуальных платформ для подготовки и проведения специализированных робототехнических соревнований высокого уровня с минимальными потерями качества их организации, соотнесенные с предметом нашего исследования. Предложены некоторые результаты анализа поиска формата проведения (переноса) робототехнической олимпиады в виртуальную среду, с учетом задачи мониторинга эффективности использования цифрового и виртуального пространства путем соответствующего тестирования как самих возможностей, так и технологий, представленных в симуляторах роботов (CoppeliaSim, Gazebo, TRIK Studio). Методология исследования выстраивалась с привлечением методов системной организации, сбора максимально доступного количества данных, обработки, интерпретации и дескрипции полученных результатов с целью осознания объективной картины реализации потребностей статусных соревнований в условиях трансформирующейся действительности. Нам представляется, что предоставленные авторами данные могут заинтересовать представителей профессионального сообщества, включающего в себя методистов, преподавателей профильных дисциплин, руководителей кванториумов, организаций дополнительного школьного образования, тренерского состав и др.

Ключевые слова
Робототехнические соревнования, виртуальная среда, высокоуровневые олимпиады, CoppeliaSim.

Preparation and holding of a robotics Olympiad in a virtual environment

Alexey Y. Ovsyannikov✉, Irina A. Statkevitch, Alexander V. Maloletov
Autonomous noncommercial organization of higher education «Innopolis University» (Innopolis University), Innopolis, Russia, a.ovsyannikov@innopolis.ru

Abstract
The article explores the virtual environment and the capabilities of virtual platforms for the preparation and conduct of specialized high-level robotics competitions with minimal loss of quality of their organization, correlated with the subject of our study. Some results of the analysis of the search for the format of holding (transferring) the robotics olympiad to the virtual environment are proposed, considering the task of monitoring the effectiveness of using digital and virtual space by appropriate testing of both the capabilities themselves and the technologies presented in robot simulators (CoppeliaSim, Gazebo, TRIK Studio). The research methodology was built using methods of system organization, collecting the maximum available amount of data, processing, interpretation and description of the obtained results to understand the objective picture of the implementation of the needs of status competitions in the conditions of transforming reality. It seems to us that the data provided by the authors may be of interest to representatives of the professional community, including methodologists, teachers of specialized disciplines, heads of quantoriums, organizations of additional school education, coaching staff, etc.

Key words
Robotics competitions, virtual environment, high-level olympiads, CoppeliaSim.

Поскольку современное общество, в котором «цифровые и аналоговые миры становятся одним целым», а «цифровые сети и ИИ прямо сейчас изменяют бизнес и общество» [1] академическая, равно как и педагогическая, среда вынуждены не просто констатировать ведущую роль робототехнических направлений подготовки; повышенный запрос социума на высококвалифицированных специалистов данной отрасли и факт того, что определение способностей к обучению техническим специальностям в юношеской среде необходимый темпоральный критерий, поскольку одаренность в данной области не менее актуальна, чем в любой другой. Поэтому ведущие вузы страны стали площадками для круглогодичной подготовки школьников к участию в высокоуровневых олимпиадах и робототехнических соревнованиях международного уровня. Одна из таких площадок около десяти лет функционирует на базе университета «Иннополис» (отдел организации олимпиад; отдел довузовской подготовки), что позволяет нам описать некоторые результативные методические техники профессионального сопровождения участников олимпиадного движения, учитывая уровень их подготовленности, мотивированности и прогнозируемых перспектив.

Робототехнические соревнования и олимпиады, которые до 2020 г. проводились в установленном формате (очно) и имеющие целью демонстрацию участниками навыков работы с оборудованием и/или демонстрацию работы устройства (робота), решающего поставленную задачу, в указанный период столкнулись с рядом серьезных вызовов (от технического оснащения площадок, до формирования новых методик и практик сопровождения). Допандемийная парадигма таких соревнований 2019-2020 гг. может быть представлена высокоуровневой олимпиадой Innopolis Open Robotics [2], участники которой, выбирая из нескольких предложенных профилей интересный для них, должны были подготовить робота таким образом, чтобы решить практические задачи, заявленные в условиях. К профилям, предложенным в рамках высокоуровневых специализированных робототехнических соревнований Innopolis Open Robotics отнесены следующие: «Манипуляционные ИРС» (или «МанИРС»), «Мобильные ИРС» (или «МобИРС»), «Интеллектуальные АНПА», «Интеллектуальные БПЛА», «Творческие ИРС».

Пандемия COVID-19 в 2020 г. сузила возможности и рамки, как проведения, так и участия в соревнованиях, имеющих для их участников определяющее знание (поскольку ведущие вузы осуществляют зачисление абитуриентов, в том числе, и по результатам олимпиадной деятельности) настолько, что организаторы, тренеры и соревнующиеся вынуждены были уйти на самоизоляцию, а проведение всех очных мероприятий было отменено. Олимпиаду Innopolis Open Robotics введение описанных ограничений в Российской Федерации застало на этапе активной подготовки участников к финалу. Учитывая вовлеченность участников и, предпринимая все усилия к тому, чтобы финал состоялся, организационный комитет олимпиады принял решение проводить ее в формате, не предполагающем очное присутствие и, тем самым, не нарушающем санитарные ограничения. Методическими комитетами была проделана серьезная подготовительная работа и выработан наиболее удачный формат, соответствующий заявленным профилям.

Профили «Манипуляционные ИРС» и «Мобильные ИРС» выбрали вариант с подготовкой модели полигона и робота в симуляторе, при котором участникам достаточно было написать адекватную управляющую программу; подобный формат не подразумевал проверку навыков конструирования робота и его электроники.

В профиле «Манипуляционные ИРС» задача предполагала перемещение объектов в трехмерном пространстве, поэтому и симулятор должен был уметь реализовывать трехмерные модели роботов и объектов. Научно-методический комитет профиля «Манипуляционные ИРС» выбрал симулятор CoppeliaSim для создания виртуальных полигона и робота (см. рис. 1 и 2). В профиле «Мобильные ИРС» задача сводилась к перемещению робота по двухмерному полигону и поиску путей на нем. Поэтому научно-методический комитет профиля «Мобильные ИРС» выбрал достаточный для этой задачи симулятор TRIKStudio.

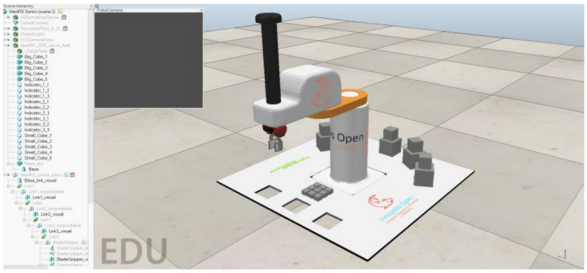


Рисунок 1 — Модель виртуального пространства и робота старшей возрастной группы профиля «Манипуляционные ИРС»

Научно-методическим комитетом указанных выше профилей в указанных обстоятельствах предложен формат проведения олимпиады с использование симуляторов для отработки и проверки у участников навыков создания высокоуровневых алгоритмов, таких как: компьютерное зрение, поиск оптимального пути движения робота или порядка сортировки объектов, определение и распознавание объектов различных форм, цветов и размеров. Симулятор позволил начинающим и малоопытным командам перераспределить время в пользу представляющих для них больший интерес решения алгоритмических задач и реализации усвоенных навыков, поскольку такой соревновательный формат сводит к минимуму сложности, возникающие при «укрощении железа». В сложившихся обстоятельствах научно-методическими комитетами «МанИРС» и «МобИРС» проверка навыков работы с железом была отложена на будущие сезоны олимпиады. Избрав предметом исследования ресурсы и перспективы виртуальных платформ в качестве особого контекста реализации статусных робототехнических соревнований определили способы подготовки к реализации профиля «Манипуляционные ИРС»: нами были подготовлены комплекты сцен симулятора CoppeliaSim для двух возрастных групп [3]. Каждый комплект содержал следующие элементы:

- тренировочная сцена для участника;
- генератор расстановок объектов;
- библиотека функций на трех языках программирования: Python, C++ и Lua;
- система проверки.

Младшая возрастная группа была рассчитана на детей 7-8 классов. В школьной программе этих классов учащиеся знакомятся с понятием системы координат и прямоугольной системой координат. Как следствие

сцена для участников младшей возрастной группы (см. рис. 2) содержала робота с максимально простой кинематикой, повторяющей прямоугольную систему координат. Три степени подвижности обеспечивали перемещение по координатам X, Y и Z.

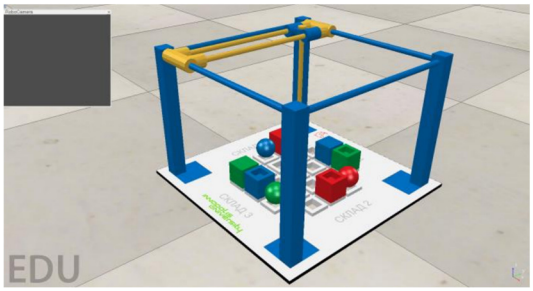


Рисунок 2 — Модель виртуального робота младшей возрастной группы профиля «Манипуляционные ИРС»

Старшая возрастная группа подразумевала участие детей 9–11 классов, знакомых с тригонометрическими понятиями, функциями и теоремами, такими как теорема косинусов. Как следствие сцена для участников старшей возрастной группы (см. рис. 1) содержала робота с кинематикой SCARA. Сама кинематика подразумевает работу в цилиндрической системе координат, от участников уже требовалась реализация преобразования координат из прямоугольной в цилиндрическую систему, привязку их к обобщенным координатам робота.

В обеих возрастных группах модели роботов были оборудованы камерами, в сценах присутствовали интерфейсы для демонстрации изображений с них.

Регламент задач обеих возрастных групп подразумевал случайные стартовые расстановки игровых объектов и описывал правила этих расстановок. С учетом этих правил в сцены были добавлены генераторы расстановок: была возможность как случайного генератора, так и ручного выбора позиции всех объектов для отработки решения одних и тех же комбинаций.

Симулятор CoppeliaSim содержит множество команд и возможностей, недоступных в процессе взаимодействия с реальным роботом [4]; например, при написании программ для него возможны лишь считывания координат любых объектов на сцене, перемещение этих объектов без захвата в манипулятор и т.д. Для исключения эксплуатации участниками подобных команд научно-методическим комитетом была разработана библиотека функций, приближенных к подобным на реальных роботах: перемещение звеньев робота в определенное положение, считывание этих положений, открывание и закрывание схватов, считывание данных с камер и т.д. Эти функции, вынесенные в отдельный файл, который коммуницировал с симулятором, позволил программе участника коммуницировать с этим файлом. Программа участника не имела доступа к полному набору функций симулятора, только к подготовленной организаторами библиотеке. И уже перед запуском зачетной попытки на проверяющей системе в нее копировались некоторые настройки сцены и программный код участников, сохраняя неизменной библиотеку функций. Таким образом отсекалось использование команд симулятора вне разрешенного списка.

Библиотека функций кроме прочего позволяла варьировать сложность заданий для разных возрастных групп. Например, для младшей возрастной группы был реализован перевод координат из миллиметров в метры и обратно, а для старшей два комплекта функций поворотов звеньев – работающие в радианах и градусах, на выбор самих участников.

Библиотека функций была написана для двух наиболее популярных среди участников языков программирования (Python и C++), а также для поддерживаемого симулятором на базовом уровне языка Lua. Перед переносом задания в симулятор организаторами был проведен опрос участников на используемые языки программирования, среди которых были выбраны два наиболее популярных. Язык Lua был выбран как один из наиболее простых, который быстро могли освоить участники, не программировавшие на Python и C++.

Система проверки решений участников была задумана достаточно развитой, но в процессе подготовки выдержала значительные изменения. Для каждой команды был подготовлен репозиторий Git и скрипты, которые по расписанию (в 12:00 и в 15:00) делали срез Master-веток репозиториев – решения для первой и второй попыток. Технология Git позволяла нескольким участникам одной команды работать параллельно и независимо друг от друга, находясь в разных местах; возможность создания веток и гибкого переноса кода позволяли выгружать в Master-ветку уже проверенный работающий код. Но скрипт копировал репозитории медленно, в течение нескольких минут, что создавало некоторые неравные условия – команды с большими номерами из конца списка скрипта могли догружать решения эти несколько минут. Во второй день финала скрипты были доработаны, а репозитории Git позволили отследить время каждого внесенного изменения и повторно проверить решения участников, выбрав загруженные до времени окончания тренировок (12:00 и 15:00).

Следующим элементом механизма проверки был скрипт, загружающий программный код (решение) и параметры сцены конкретного участника / команды на один из проверяющих компьютеров. Подобный перенос кода, как и говорилось ранее, позволял отсечь использование функций симулятора сверх разрешенного

списка. На проверяющих компьютерах были развернуты видоизмененные сцены – в них были добавлены камеры и виды для лучшей наглядности выполнения задания; генератор считывал из файла расстановку, единую для всех команд в этой попытке; а при запуске симуляции включалась видеозапись и скрипт-судья. Скрипт-судья следил за корректностью выполнения задачи и при необходимости мог остановить симуляции (например, если робот повторно касался «утерянного объекта», что было в регламенте еще до переноса в симулятор и на очных соревнованиях контролировалось бы человеком-судьей). Видеозапись нужна была для рассмотрения возможных апелляций и повторной ручной проверки.

Парк тестирующих компьютеров и системы проверки были настроены за два дня до олимпиады. При тестовых проверках выяснилось, что задача видеозаписи слишком сильно нагружала центральный процессор проверяющих компьютеров, а внешними видеокартами или современными ядрами с энкодерами / декодерами видео они не были оборудованы. В итоге проверка полного решения участника занимала более 40 минут, хотя подразумевалась троекратная проверка каждого решения за отведенные на попытку 30 минут. Научно-методическим комитетом было принято решение выполнять проверку в формате трансляции с одного компьютера, поочередно запуская решения участников. В таком формате пропадала необходимость в скрипте-судье, так как проверку и оценку проводили люди-судьи во время трансляции.

В заключении еще раз подчеркнём, что новые возможности процессов подготовки и организации масштабных робототехнических соревнований на сегодняшний день есть некоторое «партнерство человека и машины», демонстрирующее «появление совершенно нового опыта» [5], который требует особого внимания и определенного контроля на всех его этапах осуществления. Победителям и призерам описанных соревнований предстоит в дальнейшем войти в мировые лаборатории в области высоких технологий. Университет Иннополис уже сегодня располагает данными о студентах, ведущих мировых профильных вузов, которые были победителями и призерами технических направлений олимпиады Innopolis Open, а также осуществляли подготовку на площадках вуза.

Благодаря проделанной работе организаторам олимпиады удалось, не нарушая ежегодный календарный цикл подготовки, сохранить вовлеченность участников и тренеров в олимпиадный процесс. Виртуальный формат проведения позволил, хотя и не в полном объеме, оценить навыки и знания участников. Однако виртуальный формат проведения подобных соревнований отличается от очного и для полноценного его использования требует принципиально другой проработки олимпиады с момента разработки задач и до подведения окончательных итогов. Полученный и всесторонне проанализированный при участии сотрудников университета опыт позволил нам не просто определить уязвимости при проведении многоэтапных высокоуровневых соревнований робототехнической направленности, но, проанализировав данные, создать и отрабатывать методики, соответствующие формату состязаний в виртуальной среде.

Литература

1. Лахани К. Цифровое преимущество: искусство конкурировать в эпоху искусственного интеллекта / К. Лахани, М. Янсити ; пер. с англ. А. Горячев, М. Павлов. – М.: Эксмо, 2021. – 320 с.

2. Статкевич И. А. Профильная высокоуровневая международная олимпиада Innopolis Open в условиях меняющейся образовательной парадигмы / И. А. Статкевич, Р. Ю. Соловьев, К. И. Хисматуллина // Мир университетской науки: культура, образование. – 2024. – С. 32–41.

3. Овсянников А. Ю. Робототехническое онлайн-состязание: опыт и ресурсы / А. Ю. Овсянников // Профильная школа. – 2022. – Т. 10, № 3. – С. 13–22.

4. CoppeliaSim User Manual. Regular API reference : сайт. – URL: https://manual.coppeliarobotics.com/en/apiFunctions.htm (дата посещения 20.11.2024).

5. Киссинджер, Г. Искусственный разум и новая эра человечества / Г. Киссинджер, Э. Шмидт, Д. Хаттенлокер ; пер. с англ. – М.: Альпина ПРО, 2022. – 200 с. – ISBN 978-5-907534-65-0.

Информация об авторах

Овсянников Алексей Юрьевич, аспирант, методист по олимпиадной робототехнике отдела довузовской подготовки, Автономная некоммерческая организация высшего образования «Университет Иннополис» (АНО ВО «Университет Иннополис»), Россия, 420500, республика Татарстан, г. Иннополис, ул. Университетская 1, оф. 315, a.ovsyannikov@innopolis.ru

Статкевич Ирина Алексеевна, д. филос. н., профессор института гуманитарных наук и социальных наук, АНО ВО «Университет Иннополис», Россия, 420500, республика Татарстан, г. Иннополис, ул. Университетская 1, оф. 463, i.statkevich@innopolis.ru, ORCID: 0009-0002-3729-8173

Малолетов Александр Васильевич, д.ф.-м.н., профессор, директор института робототехники и компьютерного зрения, АНО ВО «Университет Иннополис», Россия, 420500, республика, г. Иннополис, ул. Университетская 1, оф. 401, a.maloletov@innopolis.ru, ORCID: 0000-0002-7312-2944

Организация кружка робототехники с детьми, оказавшимися в трудной жизненной ситуации

А.А. Борисова✉, И.А. Муртазин
Федеральное Государственное Бюджетное Образовательное Учреждение Высшего Образования «Сыктывкарский Государственный Университет имени Питирима Сорокина» (ФГБОУ ВО «СГУ им. Питирима Сорокина»), г. Сыктывкар, Республика Коми, Россия, boriska200226@mail.ru

Аннотация
В статье рассматриваются особенности детей, оказавшихся в трудной жизненной ситуации, специфичные потребности этой категории детей, организация кружковой деятельности по робототехнике ее цели и задачи, а также приводятся рекомендации по организации учебного процесса на основе личного опыта, приводятся примеры вовлечения детей в образовательный процесс. Статья может быть полезна педагогам дополнительного образования, социальным работникам и всем, кто интересуется вопросами работы с детьми из групп социального риска.

Ключевые слова
Кружок робототехники, роботы, кружковая деятельность, трудная жизненная ситуация, обучение, мотивация, поддержка.

Organization of a robotics club with children in difficult life situations

Anastasiya A. Borisova✉, Igor A. Murtazin
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Syktyvkar State University named after Pitirim Sorokin» (FGBOU VO «SSU named after Pitirim Sorokin»), Syktyvkar, Komi Republic, Russia, boriska200226@mail.ru

Abstract
The article discusses the characteristics of children in difficult life situations, the specific needs of this category of children, the organization of club activities on robotics, its goals and objectives, and also provides recommendations on organizing the educational process based on personal experience, examples of involving children in the educational process. The article may be useful for teachers of additional education, social workers and anyone interested in issues of working with children from social risk groups.

Keywords
Robotics club, robots, club activities, difficult life situation, training, motivation, support.

В современном обществе особое внимание уделяется вопросам социальной поддержки и адаптации детей, находящихся в трудной жизненной ситуации. Такие дети часто сталкиваются с трудностями на пути к успешной интеграции в общество.

Исходя из Федерального закона от 17.07.1999 N 178-ФЗ (ред. от 29.05.2024) «О государственной социальной помощи», трудная жизненная ситуация - обстоятельство или обстоятельства, которые ухудшают условия жизнедеятельности гражданина и последствия которых он не может преодолеть самостоятельно [4].

Одним из эффективных инструментов для адаптации детей в обществе является кружковая деятельность, которая помогает не только осваивать новые навыки, но и развивать уверенность в себе, учиться работать в команде.

Согласно Федеральному закону от 29.12.2012 N 273-ФЗ (ред. от 08.08.2024) "Об образовании в Российской Федерации" (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.09.2024), дополнительное образование детей и взрослых направлено на формирование и развитие творческих способностей детей и взрослых, удовлетворение их индивидуальных потребностей в интеллектуальном, нравственном и физическом совершенствовании, формирование культуры здорового и безопасного образа жизни, укрепление здоровья, а также на организацию их свободного времени. Дополнительное образование детей обеспечивает их адаптацию к жизни в обществе, профессиональную ориентацию, а также выявление и поддержку детей, проявивших выдающиеся способности. Дополнительные общеобразовательные программы для детей должны учитывать возрастные и индивидуальные особенности детей [3].

Однако организации дополнительного образования требует особого подхода и учета специфики обучающихся. Дети, оказавшиеся в трудной жизненной ситуации, имеют ряд особенностей, которые могут негативно сказаться на их обучении и развитии. К таким проблемам можно отнести:

– психологические трудности: дети, пережившие травматические события, находящиеся в состоянии стресса, как правило, испытывают трудности с концентрацией внимания, запоминанием и усвоением информации;

– низкий уровень мотивации: в неблагополучных семьях, как правило родители не являются хорошим примером для подражания, что приводит к тому что дети часто не видят смысла в учебе и не имеют мотивации к получению образования;

– социальная дезадаптация: обучающиеся могут испытывать трудности в общении со сверстниками и педагогами, быть зажатыми – «изолированными» от общества и, наоборот, проявлять агрессию в сторону сверстников и педагогов;

– отсутствие базовых навыков: такие дети зачастую могут не иметь доступа к качественному образованию и следовательно не могут получить базовые навыки для успешного обучения.

Для работы с учащимися, оказавшимися в трудной жизненной ситуации, Мардахаев Л.В. выделяет следующие группы социально-педагогических технологий:

1. Связанные с реализацией общих процессов, свойственных целям и задачам социально-педагогического сопровождения – это технологии социального образования, социального воспитания, социального формирования; социального закаливания, социального становления, которые в своей совокупности обеспечивают социализацию, социальное развитие человека (прогрессивное или регрессивное).
2. Специфические технологии социально-педагогического сопровождения, определяемые ее основными функциями: диагностирования, оценивания, прогнозирования, моделирования, проектирования, программирования.
3. Частные социально-педагогические технологии, обусловленные жизненными ситуациями: адаптации, анимации, компенсации, консультирования, контроля, коррекции, мобилизации, обеспечения, патронирования, посредничества, просвещения, профилактики, реабилитации, стабилизации, терапии, экспертизы и др. [2].

Основными средствами реализации социально-педагогического сопровождения детей и подростков, попавших в трудную жизненную ситуацию, являются:

– отбор содержания и форм педагогического сопровождения социализации подростков, попавших в трудную жизненную ситуацию;

– организация социального партнерства субъектов микросоциума по социализации подростков, попавших в трудную жизненную ситуацию;

– оценка результативности педагогического сопровождения социализации подростков, попавших в трудную жизненную ситуацию [1].

На данный момент большую популярность в нише дополнительного образования занимают кружки робототехники. Такие кружки развивают:

– логическое мышление;
– пространственное мышление;
– креативность.

Знакомство с робототехникой может стать отправной точкой для выбора будущей профессии в сфере STEM (наука, технология, инженерия, математика). Робототехника, как современная и увлекательная область поможет не только заинтересовать ребят, но и заставит взглянуть на мир по новому.

Рассмотрим организацию кружка робототехники на базе Центра досуга и кино “Октябрь” мкр. в. Чов. Кружок представляет собой объединение детей из социально-реабилитационного центра для несовершеннолетних, приведенных на кружок для развития технических навыков, изучения основ робототехники, программирования, конструирования и формирования интереса к науке.

Основная цель данного кружка - обеспечение детей, находящихся в трудной жизненной ситуации, возможностью получения качественного, интересного, современного дополнительного образования. Так же важным аспектом является создание доверительной атмосферы и взаимопонимания между участниками. Дети должны ощущать поддержку и уважение со стороны педагога и сверстников, что поможет им в дальнейшем преодолеть все трудности и достичь успеха в обучении.

Задачи кружка робототехники:

– обучение основам робототехники;
– развитие навыков программирования;
– формирование интереса к науке и технике;
– социализация детей через участие в парных и групповых проектах,
– повышение самооценки и формирование уверенности в себе.

Особенности группы

– возраст: 12-17 лет;
– группа: 6-10 человек (девочки, мальчики);
– техническая база: персональные компьютеры, интерактивная доска, проектор, наборы LEGO BOOST, LEGO MINDSTORMS EV3, LEGO Education WeDo 2.0, LEGO SPIKE Prime, поля для соревнований.

Особенности детей, обучающихся в кружке:

– поскольку дети находятся в социально-реабилитационном центре для несовершеннолетних, неизвестно, сколько ребенок пробудет в нем, может, неделю, а может и несколько лет. Исходя из этого в группе нет постоянного состава;

– дети с разным уровнем подготовки: читающие с трудом и не знакомые с LEGO; в прошлом занимавшиеся техническим творчеством;

– выбор не по интересу: у многих детей отсутствует мотивация заниматься в кружке, или вообще нет предрасположенности, так как за них решили работники центра, куда они будут ходить.

Для обеспечения благоприятной атмосферы при изучении робототехники мы предлагаем:

– выстраивать учебный процесс таким образом, чтобы уроки не зависели от друг друга и чтобы каждый имел свое логическое завершение;

– организовывать парную и групповую деятельность;

– использовать личностный подход.

Важно помнить, что каждый ребенок уникален, и то, что интересно одному, может быть не интересно другому. Поэтому при работе с детьми важно найти подход, который будет эффективным для каждого ребенка.

При обучении детей, которые не проявляют интереса к робототехнике мы предлагаем подходить к изучению робототехники через личные интересы детей.

Например: способы, которые помогут привлечь ребенка, который любит собак, заниматься робототехникой:

– рассказать о связи между робототехникой и собаками, о роботах, которые созданы для того, чтобы ухаживать за питомцами;

– поддерживать его интерес к собакам;

– предложить проект, связанный непосредственно с увлечением ребенка:

Проект «Собака из LEGO SPIKE Prime»

Цель проекта: создать модель собаки из конструктора LEGO SPIKE Prime.

Задачи проекта:

– изучить основные принципы работы с конструктором LEGO SPIKE Prime;

– разработать дизайн-проект модели собаки;

– собрать модель собаки, используя конструктор LEGO SPIKE Prime;

– запрограммировать модель собаки для выполнения определённых действий;

– провести испытания модели и оценить её работоспособность.

Этапы проекта:

Подготовительный этап: изучение основ работы с конструктором, выбор дизайна модели, подготовка необходимых материалов (см. рис. 1).

Рисунок 1 — Набор LEGO SPIKE Prime

– Сборка: сборка модели собаки из деталей конструктора.

– Программирование: написание программы для управления моделью собаки.

– Испытание: проверка работоспособности модели, оценка её функциональности и возможностей.

– Презентация: демонстрация проекта перед аудиторией, обсуждение результатов и возможных улучшений (см. рис. 2).

Рефлексия: анализ проделанной работы, выявление сильных и слабых сторон проекта, определение дальнейших шагов.

В рамках дополнительного образования проект может стать основой для более глубокого изучения робототехники, программирования и конструирования. Он также может способствовать развитию творческих способностей, логического мышления и навыков работы в команде.

Вот несколько идей для улучшения проекта:

– добавить дополнительные функции к модели собаки, например, возможность виляния хвостом, лая;

– использовать датчики для создания более реалистичного поведения собаки, например, реакцию на звук или движение;
– создать несколько моделей собак разных пород и провести соревнования между ними.

Этот проект может быть реализован как индивидуально, так и в группе. В зависимости от уровня подготовки участников.

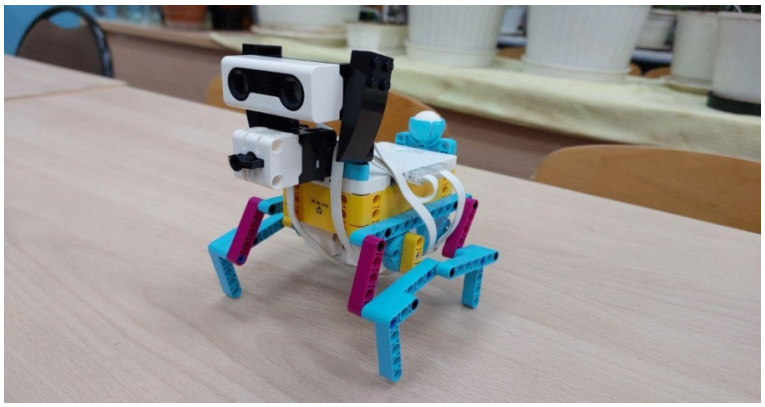


Рисунок 2 — Сборка робота-собаки

Организация кружков по робототехнике может стать эффективным инструментом социальной адаптации и реабилитации детей, находящихся в трудной жизненной ситуации, поскольку проектная деятельность способствует развитию технических навыков, логического мышления, креативности и коммуникативных способностей. Кроме того, занятия робототехникой могут помочь детям приобрести уверенность в себе и своих способностях, а также научиться работать в команде.

Для успешной реализации кружковой деятельности необходимо учитывать индивидуальные особенности и потребности каждого ребенка, создавать комфортную и безопасную среду, а также привлекать квалифицированных педагогов и специалистов. Важно также обеспечить доступность занятий для всех детей независимо от их социального статуса и материального положения.

Литература

1. Макеева, Т.В. Социально-педагогическое сопровождение детей, оказавшихся в трудной жизненной ситуации // Ярославский педагогический вестник. 2013. №2.- Том II (Психолого-педагогические науки) URL: https://cyberleninka.ru/article/n/sotsialno-pedagogicheskoe-soprovozhdenie-detey-okazavshihsya-v-trudnoy-zhiznennoy-situatsii (дата обращения - 10.09.2024).
2. Мардахаев, Л. В. Социально-педагогическое сопровождение и поддержка человека в жизненной ситуации / Л. В. Мардахаев // Педагогическое образование и наука. – 2010. – № 6. – С. 4-10. – EDN OJJSXB. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_17062300_97519509.pdf (дата обращения – 11.09.2024).
3. Федеральный закон от 29.12.2012 N 273-ФЗ (ред. от 08.08.2024) «Об образовании в Российской Федерации» (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.09.2024) URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_140174/2f0cff66d896f7b9817e26dba7e5f3207df5c43e/ (дата обращения – 05.09.2024).
4. Федеральный закон от 17.07.1999 N 178-ФЗ (ред. от 29.05.2024) «О государственной социальной помощи» URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_23735/856b6aa7481e4adff8c72e4d43400e82544de974/ (дата обращения – 05.09.2024).

Информация об авторах

Борисова Анастасия Александровна, студент, Федеральное Государственное Бюджетное Образовательное Учреждение Высшего Образования «Сыктывкарский Государственный Университет имени Питирима Сорокина» (ФГБОУ ВО «СГУ им. Питирима Сорокина»), Россия, 167001, г. Сыктывкар, Октябрьский пр., д. 55, boriska200226@mail.ru

Муртазин Игорь Анатольевич, канд.пед.наук., доцент, ФГБОУ ВО «СГУ им. Питирима Сорокина», Россия, 167001, г. Сыктывкар, Октябрьский пр., д. 55, Igorkyokushin@yandex.ru

Робототехника и образование: школа, университет, производство

А.В. Ащеулова
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза, летчика-космонавта А.А. Леонова» (ТУ им. А.А. Леонова), г. Королев, Россия, a-korolev-a@mail.ru

Аннотация
В соответствии с Поручением правительства и соответствии с Постановлением правительства Российской Федерации для решения задач кадровой политике в нашей стране реализуются новые программы и проекты. Разработано более тысячи образовательных программ, созданы научно – исследовательские лаборатории для повышения потенциала университетов и научных организаций, а также обеспечения участия образовательных организаций высшего образования в социально-экономическом, технологическом развитии субъектов РФ. Образовательные стандарты, вариативность образования, интеграция отношений между индустриальными - партнерами, научно - исследовательскими организациями и вузами, инженерные школы, передовые инженерные школы создают фундамент инновационного обучения. Преемственные программы обучения позволяют сократить сроки обучения за счет интенсификации образовательного процесса и переноса изучения основ профильных дисциплин в возрастные рамки школы. Современные потребности общества создают импульс для стратегически обоснованного развития образования без ограничений для обучающихся в выборе знаний, умений и навыков в различных сферах деятельности, с определением жизненных ценностей, при выбранной профессиональной траектории. Цель публикации – исследование современных педагогических подходов подготовки специалистов для работы на высокотехнологичных производствах. Педагогика, как наука настоящего и будущего, меняет ориентиры, содержание и технологические инструментарии процесса обучения на инновационные, актуализируя современные образовательные программы для подготовки специалистов. В ее структуре профессионализация отражает насущную потребность экономики в высококвалифицированных, практически подготовленных кадрах, востребованных на рынке труда. Робототехника – одно из самых перспективных и динамично развивающихся направлений в современном мире. Сегодня роботы проникают во все сферы жизни человека, поэтому профессии инженеров-технологов этой области являются наиболее востребованными на современном этапе: активно развивается строительная, промышленная, бытовая, авиационная и экстремальная робототехника. Введение Болонской образовательной схемы с возможностью создания единого европейского мобильного образовательного пространства существенно повлияло на российское высшее образование. Отечественное вузовское образование потеряло свои преимущества, которыми исторически обладало – воспитание русского инженера как представителя класса интеллигенции, готового активно принимать участие в процветании своей страны. Русская инженерная школа со времен становления основывалась на единстве триады «образование-наука-промышленности». На современном этапе необходимо восстановить триаду при ведущей роли промышленной компоненты посредством педагогической системы, представляющих собой целостное единство всех факторов, способствующих достижению поставленных педагогических целей: подготовка квалифицированного специалиста, развитие профессионально-личностного потенциала будущего специалиста, подготовка специалистов по обучению профессиональным знаниям и умениям, подготовка педагогов для обеспечения целенаправленного и личностно-ориентированного процесса обучения, воспитания и развития отдельного учащегося и др. Принципы педагогической системы: оптимальность, структурность, функциональность, интегративность, рассматривается как динамическая система, отношения между компонентами постоянно изменяются. Для современного образования характерно активное развитие структурных составляющих: цель образования, содержание образования, методы, средства и формы обучения, преподавательский состав, обучающиеся. Гарантом успеха обучения специалистов инженерной направленности являются базовые принципы: опора на традиции инженерной культуры, системный подход при достижении цели, целеполагание, сбалансированность ресурсов, выработанная стратегия партнерских отношений, отраслевая ориентация, адаптивность, диверсификация и результативность. В статье сформулированы сравнительные и обобщающие выводы, рекомендации по совершенствованию и развитию системы подготовки кадров для высокотехнологичных производств.

Ключевые слова
Роботизация, мехатроника, робототехническое образование, высокотехнологичное производство, профориентация, профессиональное самоопределение, методология, индустрия 4.0.

Robotics and education: school, university, production

Anna V. Ascheulova
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Technological University named after twice Hero of the Soviet Union, Cosmonaut A.A. Leonov» (TU named after A.A. Leonov), Korolev, Russia, a-korolev-a@mail.ru

Abstract
In accordance with the Government Instruction and the Resolution of the Government of the Russian Federation, new programs and projects are being implemented to address personnel policy issues in our country. More than a thousand educational programs have been developed, research laboratories have been created to increase the potential of universities and research organizations, as well as to ensure the participation of higher education institutions in the socio-economic and technological development of the constituent entities of the Russian Federation. Educational standards, variability of education, integration of relations between industrial partners, research organizations and universities, engineering schools, advanced engineering schools create the foundation for innovative learning. Continuous training programs make it possible to reduce the duration of training by intensifying the educational process and transferring the study of the basics of specialized disciplines to the age limits of the school. Modern needs of society create an impetus for strategically sound development of education without restrictions for students in the choice of knowledge, skills and abilities in various fields of activity, with the definition of life values, with the chosen professional trajectory. The purpose of the publication is to study modern pedagogical approaches to training specialists to work in high-tech industries. Pedagogy, as a science of the present and future, changes the guidelines, content and technological tools of the learning process to innovative ones, updating modern educational programs for training specialists. In its structure, professionalization reflects the urgent need of the economy for highly qualified, practically trained personnel in demand in the labor market. Robotics is one of the most promising and dynamically developing areas in the modern world. Today, robots penetrate into all spheres of human life, so the professions of engineers and technologists in this field are the most in demand at the present stage: construction, industrial, household, aviation and extreme robotics are actively developing. The introduction of the Bologna educational scheme with the possibility of creating a single European mobile educational space has significantly affected Russian higher education. Domestic university education has lost its advantages, which it historically had - the education of a Russian engineer as a representative of the intelligentsia class, ready to actively participate in the prosperity of his country. Since its inception, the Russian engineering school has been based on the unity of the triad "education-science-industry". At the present stage, it is necessary to restore the triad with the leading role of the industrial component through a pedagogical system that represents a holistic unity of all factors that contribute to the achievement of the set pedagogical goals: training a qualified specialist, developing the professional and personal potential of a future specialist, training specialists in teaching professional knowledge and skills, training teachers to ensure a targeted and personally-oriented process of training, education and development of an individual student, etc. The principles of the pedagogical system: optimality, structure, functionality, integration, is considered as a dynamic system, the relationships between the components are constantly changing. Modern education is characterized by the active development of structural components: the goal of education, the content of education, methods, means and forms of training, teaching staff, students. The guarantee of success in training specialists in engineering are the following basic principles: reliance on the traditions of engineering culture, a systematic approach to achieving goals, goal setting, resource balance, a developed strategy for partnerships, industry orientation, adaptability, diversification and effectiveness. The article formulates comparative and general conclusions, recommendations for improving and developing the system of training personnel for high-tech industries.

Key words
Robotization, mechatronics, robotic education, high-tech production, career guidance, professional self-determination, methodology, industry 4.0.

Педагогика, как наука настоящего и будущего, меняет ориентиры, содержание и технологические инструментарии процесса обучения на инновационные, актуализируя современные образовательные программы подготовки специалистов и раннего «профессионального самоопределения» школьников [1]. Происходит активное внедрение в учебный процесс урочной и внеурочной деятельности школьников элементов инженерного образования «с целью формирования навыков» к осознанному выбору будущей профессии в высокотехнологичных сферах производства [2]. Кроме того, внедрение технологии «искусственного интеллекта начинает обретать свою широту в образовании, а цифровые технологии развиваются» [3]. Сегодня практики образовательной робототехники широко распространены в школах (рисунок 1). Выделим векторы образовательной робототехники: инженерно-техническое направление, естественно-научное, спортивное направление [4]. Часто для школ вектор направления спортивной робототехники, приносящий в копилку рейтинга баллы за участие в конкурсах и соревнованиях, более приоритетный. В то время как для развития инженерно-технического и естественно-научного направлений робототехники школам требуются не только преподавателя – наставника проектных работ, но и инвесторы школьных проектов.

Рисунок 1 — Фестиваль технических проектов школьников г. Королёв Московской области

Школы пробудили у детей интерес заниматься робототехникой в техническом направлении. На данном этапе необходимо поддержать инициативных, талантливых обучающихся, способных создавать и реализовывать инновационные научные проекты в технической и естественнонаучной сферах.

Быстро развивающиеся в сфере робототехники научные знания и современные технологии, делают техническую деятельность специалистов области мехатроники и робототехники ключевой в промышленном секторе экономики страны и машиностроении, в частности. Научно-технический прогресс предъявляет повышенные требования к уровню подготовки специалистов. Анализ проблемы позволяет сделать вывод: важной научно-практической проблемой является развития системы мотивации в том числе для решения практико-ориентированных задач в обучении. Обучение, построенное на интересе и потребности обучающегося, возможно лишь при уверенности студентов в качестве получаемого образования, своей конкурентоспособности. Студенты кафедры «Техники и технологии» в рамках исследования прошли тестирование и самостоятельно оценили готовность решать профессиональные задачи, связанные научно-исследовательской деятельностью. Данные самодиагностики констатируют сложность выпускников ТУ им. А. А. Леонова направления «Мехатроника и робототехника» (рисунок 2) по следующем навыкам и компетенциям: позиция 3 - исследования, разработки новых образцов; позиция 4 - проведение патентных исследований; позиция 5 - разработка новых технико-технологических систем. Данные компетенции в числе совместной персонализированной работы обучающегося с наставником, что подтверждает важность развития наставничества в нашей стране.

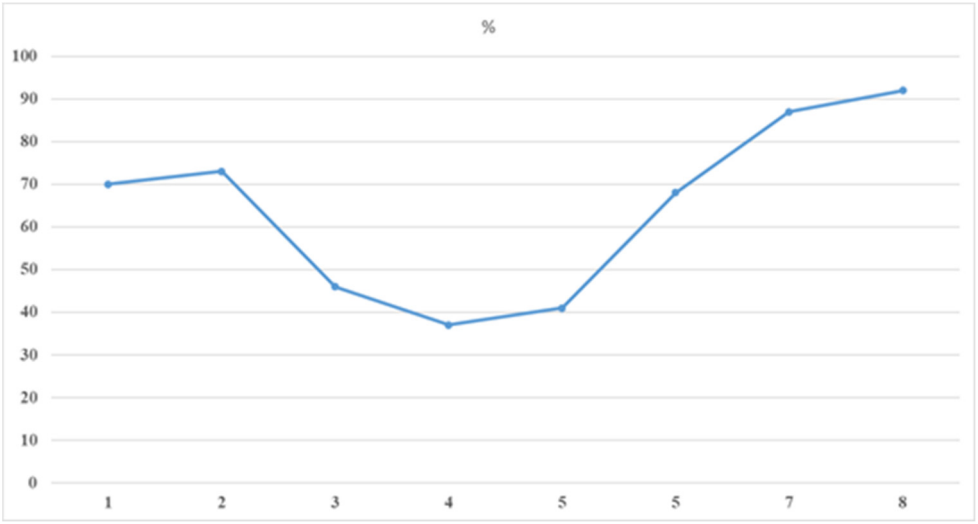


Рисунок 2 — Самодиагностика бакалавров «Готовность решать научно - исследовательские задачи»

Образовательные организации высшего образования осуществляют необходимый поиск и введение новых педагогических условий, которые позволяют перейти студентам на более высокий уровень готовности к проектной деятельности средствами робототехнического образования [5].

Рисунок 3 — Взаимосвязь образовательной робототехники и робототехнического образования

Поскольку процесс формирования и развития инженерного мышления долгая и кропотливая работа, то главная задача педагогического сообщества – создание инновационного образовательного продукта – системы формирования и развития инженерного мышления через преемственность обучения (рисунок 3).

Важными составляющими совместной работы школы и университета являются:

– помощь в трансформация содержания предмета «Технология» и внедрение сетевого взаимодействия;

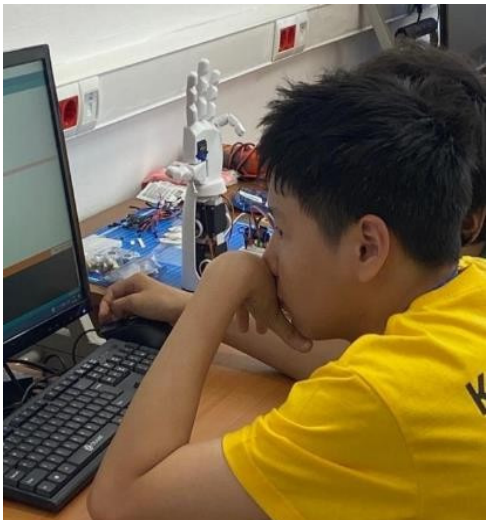


Рисунок 4 — Выполнение проекта по сборке и программированию

– совершенствование методики профессиональной ориентации школьников путем внедрения в учебный процесс элементов робототехнического образования (рисунок 4);

– организация сотрудничества со школами, колледжами, техникумами в целях ранней профориентации и включения школьников и студентов в научную и проектную деятельность (рисунок 5);

– поддержка школьников в олимпиадах и конкурсах, организованных партнерами вузов.

Развитие робототехники стоит на острие актуальности, в том числе, ввиду дефицита кадров во многих отраслях. На сегодняшний день перспективные способы взаимодействия вузов и индустриальных партнеров реализуются в реализации совместных научных исследований и формирование консорциумов, совместных образовательных программ, поддержке проектов студентов и школьников.

Рисунок 5 — Дни открытых дверей ТУ им. А.А. Леонова

Реализация сетевого взаимодействия между участниками образовательного процесса в образовательном комплексе «школа -университет - производство» в конечном итоге повысит уровень компетенций инженерно-технического направления и количество учащихся, поступающих в российские технические учебные заведения высшего профессионального образования на специальности, связанные с робототехникой.

Литература

1. Ащеулова, А. В. Компетентностно-ориентированные задания как средство профессионального самоопределения учащихся основной школы в условиях инклюзивной цифровой образовательной среды / А. В. Ащеулова, Т. Н. Суворова // Шамовские чтения : сборник статей XV Международной научно-практической конференции: В 2 ч., Москва, 21–25 января 2023 года. Том Ч. 1 – Москва: 5 за знания, 2023. – С. 177-180. – EDN CPIVFR.
2. Проектирование системы доступа к полезной нагрузке платформы аппаратно-программного комплекса «Ларец». А.В. Ащеулова, В.А. Барсуков, Д.Г. Демьяненко, А.П. Мороз // Инженерный вестник Дона, №8 (2024) http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2024/942.
3. Ащеулова А.В., Якимов С.Е. Проектирование и изготовление манипулятора с применением аддитивных технологий. https://na-journal.ru/5-2024-tehnologii-proizvodstva/12164-proektirovanie-i-izgotovlenie-manipulyatora-s-primeneniem-additivnyh-tehnologii.
4. Ascheulova AV, Gribkov DN, Mamaeva EA, Nimatulaev MM. Using 3D-modeling to improve the quality of bachelors' training in the field of socio-cultural activities. RUDN Journal of Informatization in Education. 2023;20(3):316–327. http://doi.org/10.22363/2312-8631-2023-20-3-316-327.
5. Кузьмина, М. В. др. Робототехника в школе как ресурс подготовки инженерных кадров будущей России // сборник методических материалов для работников образования в условиях реализации Федеральных государственных образовательных стандартов (по итогам областных семинаров и курсов повышения квалификации по образовательной робототехнике) [Электронный ресурс]: ИРО Кировской области, 2017. – 179 с.

Информация об авторt

Ащеулова Анна Владимировна, преподаватель кафедры Техники и технологии, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза, летчика-космонавта А.А. Леонова» (ТУ им. А.А. Леонова), Россия, 141074, Московская область, г. Королев, ул. Гагарина, д. 42, a-korolev-a@mail.ru, SPIN: 8480-5978, ORCID: 0000-0003-2595-0080

Разработка образовательного реконфигурируемого мобильного робототехнического комплекса для проведения командных, научно–технических и инженерных соревнований

П.А. Таганов, Н.П. Коренко, А.В. Печуркин, И.В. Сеньковски
Государственный научный центр Российской Федерации «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики» (ГНЦ РФ ЦНИИ РТК), Санкт-Петербург, Россия, p.taganov@rtc.ru, n.korenko@rtc.ru, a.pechurkin@rtc.ru, i.senkovski@rtc.ru

Аннотация
В статье представлен новый образовательный реконфигурируемый мобильный робототехнический комплекс «Мультибот», разработанный для выполнения задач по автономной навигации на реконфигурируемом лабиринте-полигоне в рамках соревнований «Кубок РТК — Высшая Лига». Учитывая растущий интерес к автономным системам и необходимость повышения сложности робототехнических соревнований, «Мультибот» отличается инновационными решениями, позволяющими эффективно адаптироваться к различным задачам. Основные преимущества робота заключаются в использовании магнитных монтажных пластин, обеспечивающих гибкость в размещении сменной полезной нагрузки, и жесткой подвески, повышающей предсказуемость движений для точной навигации. Также применение упрощенной конструкции корпуса улучшает ремонтопригодность и облегчает монтаж сменной полезной нагрузки. Разработанный подход позволяет преодолеть ограничения существующих робототехнических платформ и создает универсальную базу для успешного участия в соревнованиях «Высшая Лига», способствуя развитию технологий и подготовке специалистов в области робототехники.

Ключевые слова
Робототехника, инженерные соревнования, реконфигурируемый робот.

Благодарности
Результаты получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России № 075-00697-24-03 от «04» июля 2024 г. «Научно–методическое и ресурсное обеспечение проведения молодежных соревнований и образовательных мероприятий с целью популяризации и продвижения научных знаний в области робототехники и мехатроники».

Development of an educational reconfigurable mobile robotic complex for participating team, scientific and engineering competitions

Pavel A. Taganov, Nikita P. Korenko, Aleksandr V. Pechurkin, Ilya V. Senkovski
Russian state scientific center for robotics and technical cybernetics, St. Petersburg, Russia, p.taganov@rtc.ru, n.korenko@rtc.ru, a.pechurkin@rtc.ru, i.senkovski@rtc.ru

Abstract
The article presents a new educational reconfigurable mobile robotic complex called «Multibot», designed to perform tasks of autonomous navigation on a reconfigurable training polygon of the «RTC Cup – Top League» competition. Innovative solutions featured in «Multibot» allow adapting it for various tasks considered by growing interest in autonomous systems and the necessity to increase the complexity of robotics competitions. The main advantages of the robot are the use of magnetic mounting plates, which provide flexibility in placing of sensors and equipment, a rigid suspension, which enhances movement predictability for precise navigation, and the simplified construction, which makes easier to repair robot and change payload. The developed robotic complex exceeds existing robotic platforms and creates a universal base for successful participation in the «Top League» competition, contributing to the development of technologies and training of specialists in the field of robotics.

Key words
Robotics, engineering competitions, reconfigurable robot.

Введение

Робототехнические соревнования играют важную роль в развитии технологий и подготовке специалистов в области робототехники. Одним из таких мероприятий является «Кубок РТК» – соревнование, которое долгое время служит площадкой для демонстрации навыков управления роботами в режиме телеуправления [1,2]. Однако, с развитием технологий и растущим интересом к автономным системам, возникла потребность в более сложных и технически продвинутых соревнованиях. В ответ на эту потребность был создан новый формат

соревнований – «Кубок РТК – Высшая Лига» [3]. Данный формат нацелен на освоение обучающимися комплексного подхода к очувствлению роботов, проведение командных робототехнических соревнований по автономной навигации роботов на реконфигурируемом лабиринте-полигоне [1].

«Высшая Лига» предъявляет повышенные требования как к участникам, так и к роботам. От команд ожидается глубокое понимание алгоритмов компьютерного зрения, навигации и планирования маршрута. Роботы должны быть оснащены сенсорными системами, содержащими камеры, лидары, различные датчики, а также обладать достаточной вычислительной мощностью для обработки больших объемов данных в реальном времени.

При рассмотрении возможности адаптации уже существующих робототехнических комплексов для участия в «Высшей Лиге», таких как «Агробот», «Ровер» или «Студент» [4,5], был выявлен ряд проблем, затрудняющих внедрение этих комплексов для решения задач соревнований. Указанные роботы обладают сложной конструкцией, созданной для повышения проходимости, в частности, имеют подвижную подвеску, увеличенные колёсную базу и колёса. Эти факторы затрудняют точное позиционирование робота, что критично для автономной навигации в замкнутом пространстве полигона, и усложняют ремонт робота в условиях ограниченного времени соревнований. Кроме этого, небольшой набор зон для монтажа дополнительного оборудования на борту робота и фиксированные точки его крепления значительно ограничивают возможности по адаптации этих роботов под задачи «Высшей Лиги».

Учитывая эти ограничения, было принято решение о разработке нового робототехнического комплекса – «Мультибота», специально спроектированного для участия в «Высшей Лиге». «Мультибот» обладает рядом существенных преимуществ, позволяющих значительно повысить конкурентоспособность робота на соревнованиях.

Во–первых, монтажные пластины робота выполнены из магнитного материала, что позволило размещать датчики, камеры и другое оборудование на магнитных креплениях в любых местах на поверхности пластин. Это обеспечивает возможность быстрой адаптации конфигурации полезной нагрузки под конкретные задачи и условия полигона.

Во–вторых, в конструкции робота применена жесткая подвеска без дополнительных степеней подвижности, что повысило повторяемость и предсказуемость движений робота в различных направлениях. Это особенно важно для точного позиционирования и навигации в автономном режиме.

В–третьих, использование упрощённой конструкции корпуса и снижение количества крепёжных элементов позволили повысить ремонтопригодность и простоту монтажа сменной полезной нагрузки.

Такой подход к конструкции робота позволяет преодолеть ограничения существующих моделей и создать универсальную платформу, способную эффективно решать широкий спектр задач, предлагаемых в рамках соревнований «Высшая Лига».

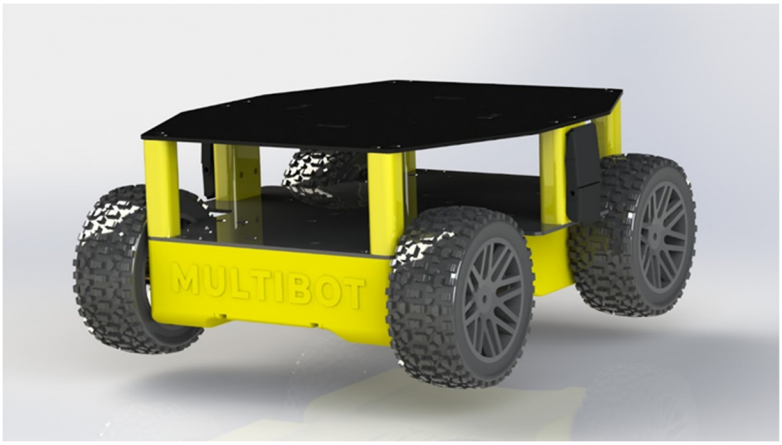


Рисунок 1 — Внешний вид реконфигурируемого робота «Мультибот»

Реконфигурируемый робот «Мультибот» решает актуальную задачу повышения гибкости и функциональности мобильных роботов за счет расширения возможностей реконфигурирования при одновременном обеспечении простоты и надежности монтажа сменного оборудования.

Реконфигурируемый мобильный робот выполнен в виде самоходной платформы, монтажные пластины которой изготовлены из магнитного материала (рис. 1). На этих пластинах с помощью магнитов монтируются бортовой компьютер и сменная полезная нагрузка робота (датчики, манипулятор и т.д.) (рис. 2). Помимо обеспечения поверхности для установки полезной нагрузки, нижняя монтажная пластина является несущим основанием для всей платформы.

В конструкции робота применены решения, повышающие ремонтопригодность и обеспечивающие простоту монтажа сменной полезной нагрузки.

Так, для обеспечения простоты монтажа сменной полезной нагрузки используемые магнитные крепления выполнены в виде стоек, в основания которых вмонтированы магниты, которые служат для крепления полезной нагрузки. В качестве вертикальной части стоек использованы запрессованные в основания болты, на которые устанавливается сменная полезная нагрузка, фиксируемая с помощью гаек. Для использования указанных магнитных стоек предполагается наличие монтажных отверстий в корпусе сменной полезной нагрузки. В случае их отсутствия предлагается использовать разработанные специальные держатели, имеющие боковые пазы для фиксации полезной нагрузки по периметру.

Рисунок 2 — Робот с установленными модулями сменной полезной нагрузки

Кроме этого, для обеспечения ремонтопригодности и облегчения доступа к внутренним компонентам робота использованы бугельные замки, позволяющие быстро и удобно соединять монтажные пластины между собой. Между монтажными пластинами установлены пластмассовые направляющие, центрирующие и фиксирующие монтажные пластины. Направляющие имеют форму цилиндра, причем нижнее основание имеет углубление в виде усеченного конуса, а верхнее – выступ аналогичной формы, позволяя стыковать несколько цилиндров между собой.

Среди преимуществ решения можно выделить возможность быстрой реконфигурации, за счёт магнитных креплений, которые позволяют свободно размещать сменную полезную нагрузку на пластинах, а крепление быстрозажимными бугельными замками обеспечивают удобство и скорость установки монтажных пластин.

Быстрый доступ к внутреннему пространству робота и использование унифицированных магнитных креплений также обеспечивает высокую ремонтопригодность робота. В условиях ограниченного времени соревнований оператор робота имеет возможность быстро демонтировать верхнюю пластину и заменить неработоспособный модуль на новый без использования инструментов.

Стоит отметить, что использование магнитных стоек для монтажа сменной полезной нагрузки не приводит к снижению надежности конструкции. Проведённые испытания показали, что во время соревнований «Кубок РТК – Высшая Лига» робот не испытывает существенных динамических нагрузок, и такие условия эксплуатации не вызывают смещений модулей полезной нагрузки по пластинам робота.

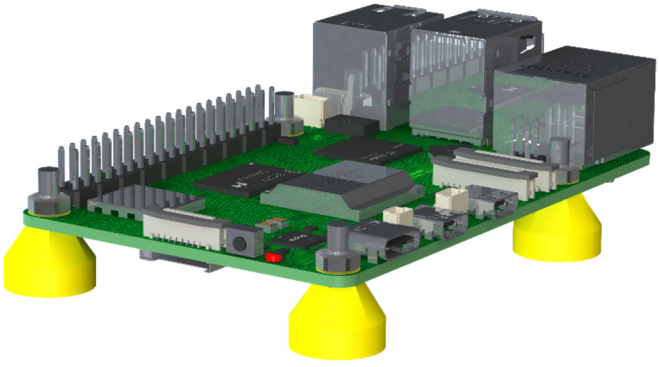


Рисунок 3 — Raspberry Pi 4 Model B на магнитных стойках

При необходимости использовать робота в условиях сильных динамических нагрузок или для закрепления массивных модулей обеспечена возможность отрегулировать силу магнитного сцепления за счёт изменения количества магнитных стоек на каждом модуле или за счёт замены стандартного магнита «таблетки» 10x3 мм

на магниты большей высоты, а, следовательно, и большей силы сцепления. Такая гибкость выбранного способа крепления модулей гарантирует их надёжную фиксацию вне зависимости от условий эксплуатации робота и от массы этих устанавливаемых модулей. Так, например, для надежного закрепления платы Raspberry Pi 4 Model B массой 46 г достаточно четырёх магнитных стоек с магнитами размером 10x3 мм (рис. 3).

Также, отсутствие необходимости в специальных крепежных элементах и простота конструкции разработанной платформы снижают стоимость производства и обслуживания.

Магнитные стойки, являющиеся ключевым элементом конструкции, представляют собой сборочную единицу, состоящую из пластмассового держателя платы, болта для закрепления плат и неодимового магнита таблеточного типа (рис. 4).

Рисунок 4 — Магнитная стойка в разнесенном виде (слева) и держатель платы, накручиваемый на магнитную стойку (справа)

Перед установкой навесного оборудования необходимо провести оценку его массы и габаритных размеров. В зависимости от этих параметров, а также от наличия монтажных отверстий на модуле, подбирается необходимое количество магнитных стоек и размер, устанавливаемых в них магнитов. Крепление магнитных стоек к модулю навесного оборудования осуществляется с помощью гаек, диаметр которых соответствует диаметру болта магнитной стойки.

В случае отсутствия монтажных отверстий на устанавливаемой полезной нагрузке используется пластмассовый держатель платы. Он крепится к магнитной стойке с помощью гайки и имеет два углубления разной ширины для фиксации плат полезной нагрузки различной толщины. Форма углубления позволяет закреплять плату как по плоской стороне, так и в ее углу. Пример закрепления платы без отверстий представлен на рисунке 5.

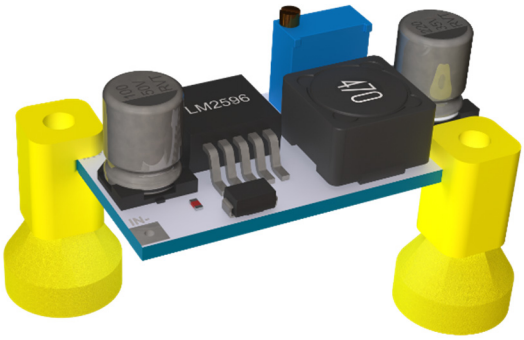


Рисунок 5 — DC-DC преобразователь напряжения, закрепленный на магнитных стойках, с держателем платы

Количество магнитных стоек с держателем платы ограничивается периметром закрепляемого модуля и подбирается, исходя из его массы и габаритов, аналогично подбору обычных магнитных стоек.

Разработанный реконфигурируемый мобильный робот успешно испытан в рамках этапа соревнований «Кубок РТК Высшая лига: РобоАэро». Робототехнический комплекс «Мультибот» был предоставлен участникам соревнований для выполнения различных заданий на полигоне. В частности, было необходимо решить задачи навигации по созданию и автономному прохождению маршрута на лабиринте–полигоне, маневрируя между переставляемыми объёмными препятствиями. На препятствиях были также нанесены цифровые метки, информацию с которых необходимо было считать при помощи камеры.

Участники соревнований отметили положительные качества робота такие, как возможность быстрой зарядки, возможность установки и изменение положения различной полезной нагрузки, например, ультразвуко-

вых датчиков расстояния и камер, что выделяет «Мультибота» перед аналогичными комплексами. Так, победитель этапа использовал стратегию крепления камеры на правую часть верхней монтажной пластины, что уменьшило количество поворотов корпуса и, как следствие, позволило сократить общее время прохождения маршрута. Для повышения манёвренных характеристик робота в ходе испытаний колёса были заменены на колёса Илона. Колёса Илона позволили совершать плавные движения боком («крабовый ход») и танковый разворот, что значительно увеличило скорость прохождения маршрута.

Пример использования «Мультибота» на полигоне «Кубок РТК – Высшая лига: РобоАэро» представлен на рисунке 5.

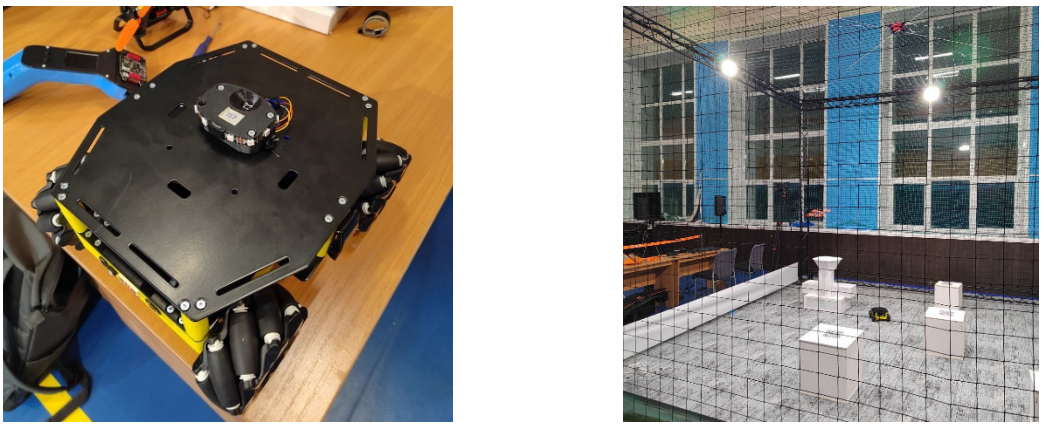


Рисунок 5 — Испытание «Мультибота» на соревнованиях «Кубок РТК – Высшая лига: РобоАэро»

По результатам практического использования робота во время соревнований было выявлено, что данное техническое решение обеспечивает быструю реконфигурацию мобильного робота, повышает его функциональность и адаптируемость к различным задачам, а также сокращает время и затраты на его обслуживание и ремонт.

Литература

1. Сеньковски И.В., Гаврилов П.А., Казанцев Г.В., Коренко Н.П., Печуркин А.В., Станкевич С.Ю. Развитие робототехнических соревнований «Кубок РТК» // Труды 34-й Международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника». — Санкт–Петербург, 2023 — С. 430–436.

2. Сайт соревнований «Кубок РТК» [Электронный ресурс]: URL: https://cup.rtc.ru (дата обращения 07.10.2024).

3. Казанцев Г.В., Гаврилов П.А., Сеньковски И.В., Коренко Н.П., Печуркин А.В., Станкевич С.Ю. Развитие робототехнических соревнований «Кубок РТК – Высшая лига» // Труды 34-й Международной научно–технической конференции «Экстремальная робототехника». — Санкт–Петербург, 2023 — С. 426–429.

4. Чебыкина А.В., Ледяева В.С., Князева Н.Л., Экспериментальная разработка научно–методического и тренировочного комплекса для освоения обучающимися технологий машинного зрения, удалённого группового управления автономными роботами и проведения командных научно–технических и инженерных соревнований регионального и федерального уровней // Труды 32-й Международной научно–технической конференции «Экстремальная робототехника». — Санкт–Петербург, 2022 — С. 131–135.

5. Пат. №2821375, Российская Федерация, МПК B25J5/00. Конфигурируемый мобильный робот / Барбанакова Я.И., Сеньковски И.В., Шарифьянов А.Р., Печуркин А.В., Лопота А.В., Князева Н.Л., Станкевич С.Ю., Шмаков О.А., Таганов П.А.; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Открытая Робототехника». – 2023121550; заявл. 16.08.2023; опубл. 21.06.2024.

Информация об авторах

Таганов Павел Андреевич, инженер, Государственный научный центр Российской Федерации «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики» (ГНЦ РФ ЦНИИ РТК), Россия, 194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 21, p.taganov@rtc.ru

Коренко Никита Павлович, инженер, ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Россия, 194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 21, n.korenko@rtc.ru, ORCID: 0009–0003–3809–0785

Печуркин Александр Викторович, начальник бюро, ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Россия, 194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 21, a.pechurkin@rtc.ru

Сеньковски Илья Владиславович, инженер, ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Россия, 194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 21, i.senkovski@rtc.ru

Коррекция показаний магнитометра БПЛА с использованием метода динамического расширения регрессора и смешивания

Н.В. Михальков✉, А.А. Пыркин
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО» (Университет ИТМО), Санкт-Петербург, Россия, nvmikhalkov@itmo.ru

Аннотация
Измерение угла курса является необходимой составляющей для реализации алгоритмов автономной навигации и управления беспилотными летательными аппаратами (БПЛА). Магнитометр является удобным средством для такого измерения, однако его показания могут искажаться нежелательными источниками магнетизма, как статическими, так и динамическими, например, силовыми электропроводами БПЛА. Искажения, вызванные близко расположенными проводниками, создают значительные трудности при восстановлении истинного сигнала из-за их нестационарного характера. Плотная компоновка и ограничение по массе БПЛА не всегда позволяют обеспечить необходимое расстояние между магнитометром и силовыми цепями. Поэтому в рамках данной работы предлагается использовать алгоритм адаптивного оценивания на базе метода динамического расширения регрессора и смешивания [1] для оценки влияния магнитных полей, индуцированных электромоторами и их цепями питания, с целью повышения точности измерений курса.

Ключевые слова
Адаптивное оценивание, магнитометр, БПЛА.

Благодарности
Работа поддержана Министерством науки и высшего образования РФ (паспорт госзадания № 2019-0898).

Correcting current-induced magnetometer errors on an unmanned aerial vehicle using dynamic regressor extension and mixing

Nikita V. Mikhalkov✉, Anton A. Pyrkin
ITMO University (ITMO), St. Petersburg, Russia, nvmikhalkov@itmo.ru

Abstract
Measuring the heading angle is a crucial component for implementing autonomous navigation and control algorithms for unmanned aerial vehicles (UAVs). A magnetometer is a convenient tool for this measurement; however, its readings can be distorted by unwanted sources of magnetism, both static and dynamic, such as UAV power cables. Distortions caused by nearby conductors create significant challenges in recovering the true signal due to their non-stationary nature. The compact design and weight limitations of UAVs often prevent maintaining the necessary distance between the magnetometer and power lines. Therefore, this work proposes the use of an adaptive estimation algorithm based on the dynamic regressor extension and mixing (DREM) method [1] to assess the influence of magnetic fields induced by electric motors and their power circuits, thereby enhancing the accuracy of heading measurements.

Key words
Parameter estimation, magnetic sensors, UAV.

Acknowledgements
The work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, state assignment passport № 2019-0898).

Введение

Трехосевой магнитометр является современным устройством для определения курсового направления во многих робототехнических приложениях. Так как магнитное поле Земли считается достаточно постоянным на широких областях пространства, магнитометры потенциально могут использоваться в качестве средств навигации, в том числе для малоразмерных беспилотных летательных средств. Однако применимость магнитометров часто ограничена, так как датчики такого типа подвержены значительному влиянию нежелательных источников магнитных полей. Кроме инструментальных ошибок, аналогичных другим трех-осевым навигационным приборам, показания магнитометра искажаются девиациями магнитного поля. Такие искажения делят на два типа. Первый тип искажений, называемый магнито-жестким, является дополнительным полем, порожденным намагниченными элементами конструкции-носителя и цепями постоянного тока. Такие поля

остаются постоянными в независимости от положения по отношению к магнитному полю. Второй тип искажений вызван полем магнито-чувствительных элементов конструкции, поле которых появляется при наличии внешнего источника магнитного поля.

Большинство искажений показаний датчика такого рода возможно компенсировать посредством калибровки на земле, однако для БПЛА с плотной компоновкой элементов существенным возмущающим фактором являются динамические искажения, создаваемые силовыми проводами во время полета. При определенных конфигурациях конструкции, такое влияние может быть доминирующим в показаниях магнитометра. Оценка влияния силовых проводов на показания магнитометра методом идентификации системы ранее была представлена в работах [2,3]. В работе [4] представлен подход на основе нелинейного наблюдателя системы, а в [5] реализуется адаптивный наблюдатель искажений для октокоптера, однако сами искажения в работе рассмотрены как постоянное возмущение. Авторами [6] удалось произвести оценку и компенсацию ошибки магнитометра посредством алгоритма адаптивного оценивания для БПЛА типа крыло с одним электромотором. Настоящая работа использует схожий подход к задаче построения алгоритма оценивания динамических возмущений, расширенный на случай множественных источников возмущений.

Описание подхода

Для получения вектора магнитного поля Земли с помощью магнитометра используются разные методы калибровок. Одними из самых эффективных и распространенных методов являются метод эллипсоидной аппроксимации [7] и метод инвариантности векторного произведения [8]. Отличительной чертой этих методов является их независимость от данных других приборов, а также относительная простота реализации. Также немаловажным будет отметить, что калибровку вышеобозначенными методами в случае БПЛА возможно осуществить, не отделяя магнитометр от места крепления, что является удобным условием применения в контексте БПЛА с плотной компоновкой элементов. Далее в работе будем считать, что калибровка инструментальных погрешностей магнитометра проведена с достаточной точностью.

Повторяя подход, предложенный в [6] для определения зависимости между магнитным полем, создаваемым моторной группой БПЛА, и командой управления, воспользуемся модельным подходом.

В соответствии с законом Био-Савара-Лапласа [9], индукция магнитного поля, создаваемая токопроводящим проводом на расстоянии, определенном вектором $\vec{r}$, вычисляется по формуле:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int \frac{d\vec{s} \times \vec{r}}{r^3} \quad (1)$$

где μ_0 – магнитная проницаемость вакуума, I – сила тока в проводнике, $Id\vec{s}$ – элемент проводника.

В рамках работы основными токонесущими проводниками будем считать провода, обеспечивающие питание моторов, а также обмотки электромоторов.

Для моделирования динамики привода БПЛА типовой моделью является следующая система уравнений динамики коллекторного мотора (рис. 1), часто применяемая в литературе как приближение более подробной:

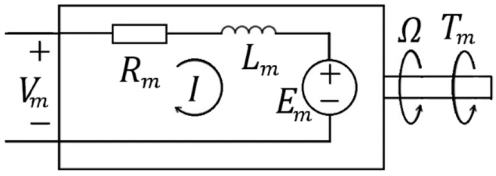


Рисунок 1 — Эквивалентная схема коллекторного мотора

$$V_m - IR_m - L_m \frac{dI}{dt} - E_m = 0, \quad (2)$$

$$E_m = K_{emf}\Omega, \quad (3)$$

$$T_m = K_T \cdot I. \quad (4)$$

Здесь V_m– это приложенное напряжение, I – сила тока якоря, R_m и L_m – сопротивление и индуктивность обмотки, Ω соответствует скорости ротора, T_m – создаваемый момент силы, E_m – ЭДС самоиндукции мотора.

Несмотря на существенную структурную разницу между коллекторными и бесколлекторными моторами, для которых отношение скорости ротора и ЭДС самоиндукции, а также силы тока и производимого момента не являются линейными характеристиками, при использовании электронного контроллера скорости мотора (Electronic Speed Controller – ESC) аппроксимация уравнениями (2)-(4) является валидной [10],[11].

Дополнительно уравнение, связывающее скорость мотора Ω и производимый момент при $\frac{dI}{dt} \equiv 0$:

$$T_m = K_T \cdot 1/R_m \cdot \left(V_m - K_{emf}\,\Omega\right) \quad (5)$$

будет использовано в дальнейшем.

В качестве модели, описывающей крутящий момент винта, в работе используется приближенное выражение, полученное посредством метода размерностей [12]:

$$Q_p = K_Q \rho \Omega^2 D^5, \quad (6)$$

где Q_p – крутящий момент винта, ρ – плотность воздуха, Ω – скорость вращения винта, D – диаметр винта, K_Q– моментный коэффициент, зависящий от конструкции винта, числа Рейнольдса, момента инерции винта.

Предполагая мгновенность отклика ESC на команду, можно утверждать, что

$$\Omega = \delta \cdot \Omega_{max}, \ \ 0 \le \delta \le 1, \quad (7)$$

где Ω_{max} – максимальная скорость вращения, δ – относительный уровень команды. При условии динамического равновесия, когда $T_m = Q_p$ в соответствии с формулами (5) и (6), схематически изображенного на рис. 2, используя выражения (4) и (6) можно представить уравнение (1) в виде:

$$\vec{B} = \frac{C_Q \rho (\delta_k \Omega_{\max})^2 D^5}{K_T} \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{d\vec{s_k} \times \vec{r_k}}{r_k^3}$$

сводимому к

$$\vec{B}=\delta_i^2 \vec{\theta}_i \quad (8)$$

где $\vec{\theta}_i \in \mathbb{R}^3$ – вектор параметров, компоненты сложно определить в рамках модельного подхода, но возможно определить, сформировав задачу оценивания параметров.

Оценивание параметров

Показания магнитометра можно представить в виде линейной модели:

$$\vec{v} \ = \ K\vec{u} + \vec{b},$$

где $\vec{v} \in \mathbb{R}^3$ – это вектор показаний магнитометра, $\vec{u}$ – суперпозиция индукций магнитных полей, измеренных датчиком, $K \in \mathbb{R}^{3\times3}$ и $\vec{b} \in \mathbb{R}^3$ – инструментальные искажения, устраняемые в ходе калибровки.

Считая, что вектор индукции магнитного поля Земли $\vec{u}_{\text{e}}$ постоянен в достаточно широкой области в несколько десятков кв. километров, в случае отсутствия ошибок калибровки, можно записать для n-роторного БПЛА, используя (8):

$$\vec{u}_{\text{e}} = \boldsymbol{R}\left(\vec{v} - \textstyle\sum_i {\delta_i}^2 \vec{\theta}_i\right) \quad (9)$$

где R – матрица поворота от глобальной системы координат к системе координат, связанной с телом, $\vec{u}_{\text{e}}$ – вектор магнитного поля Земля.

Продифференцировав (9) по времени, получим выражение:

$$0 = \dot{\boldsymbol{R}}\left(\vec{v} - \textstyle\sum_i {\delta_i}^2 \vec{\theta}_i\right) + \boldsymbol{R}\left(\dot{v} - \textstyle\sum_i \frac{d}{dt}\left({\delta_i}^2\right)\vec{\theta}_i\right) \quad (10)$$

Чтобы упростить (10), используем угловую скорость вращения БПЛА в виде кососимметричной матрицы угловых скоростей вращения $\omega_\times$ и выразим с ее помощью производную матрицы поворота:

$$\dot{\boldsymbol{R}} = \boldsymbol{R}\boldsymbol{\omega}_\times. \quad (11)$$

После применения (5) и упрощения, выражение (3) примет вид:

$$0 = \boldsymbol{\omega}_\times\left(\vec{v} - \textstyle\sum_i {\delta_i}^2 \vec{\theta}_i\right) + \left(\dot{v} - \textstyle\sum_i \frac{d}{dt}\left({\delta_i}^2\right)\vec{\theta}_i\right) \quad (12)$$

Чтобы избавиться от неизмеримых величин $\dot{v}$ и $\frac{d}{dt}\left({\delta_i}^2\right)$ в (6) применим к обеим частям уравнения линейный ограниченный оператор $H[.] = \frac{\lambda}{s+\lambda}$, где $\lambda \in \mathbb{R}^+$:

$$\frac{\lambda}{s+\lambda}(\boldsymbol{\omega}_\times\vec{v}) + \frac{\lambda s}{s+\lambda}\vec{v} = \textstyle\sum_i \frac{\lambda}{s+\lambda}\left(\boldsymbol{\omega}_\times {\delta_i}^2 + \frac{d}{dt}\left({\delta_i}^2\right)\right)\vec{\theta}_i \ . \quad (13)$$

И используем лемму о замене [13], принимающую в случае выбранного линейного оператора вид:

$$\frac{\lambda}{p+\lambda}(u^T y) = u^T \frac{\lambda}{p+\lambda} y - \frac{1}{p+\lambda}\left[\dot{u}^T \frac{\lambda}{p+\lambda}[y]\right]$$

Применительно к $\frac{d}{dt}\left({\delta_i}^2\right)\vec{\theta}_i$ компоненте уравнения (4) получим:

$$\frac{\lambda}{p+\lambda}\left(p\left(\delta_i^{\,2}\right)\theta_i\right)=\theta_i\frac{\lambda p}{p+\lambda}\left(\delta_i^{\,2}\right)-\frac{1}{p+\lambda}\left[\dot{\theta}_i\frac{\lambda p}{p+\lambda}\left(\delta_i^{\,2}\right)\right]$$

При условии постоянства параметров в формуле (8), уравнение (13) приобретает вид:

$$\frac{\lambda}{s+\lambda}(\boldsymbol{\omega}_\times\vec{v})+\frac{\lambda s}{s+\lambda}\vec{v}=\sum_i\left(\frac{\lambda}{s+\lambda}\left(\boldsymbol{\omega}_\times\delta_i^{\,2}\right)\vec{\theta}_i+\frac{\lambda s}{s+\lambda}\left(\delta_i^{\,2}\right)\vec{\theta}_i\right) \quad (14)$$

Получившееся уравнение (4) можно преобразовать в линейное регрессионное уравнение вида:

$$y=\varphi^T\Theta\,, \quad (15)$$

где $y\in\mathbb{R}^{1\times3}$ – регрессанд, $\Theta\equiv\left[\vec{\theta}_1,\dots,\vec{\theta}_n\right]^T\in\mathbb{R}^{n\times3}$ – матрица неизвестных параметров, $\varphi\in\mathbb{R}^{n\times1}$ – регрессор. Одним из современных подходов к решению задач оценивания такого типа является метод динамического расширения регрессора и смешивания [1] (DREM), позволяющий декомпозировать уравнения линейной регрессии к набору скалярных регрессионных уравнений, при этом ослабляет требование постоянного возбуждения регрессора до требования конечного возбуждения регрессора.

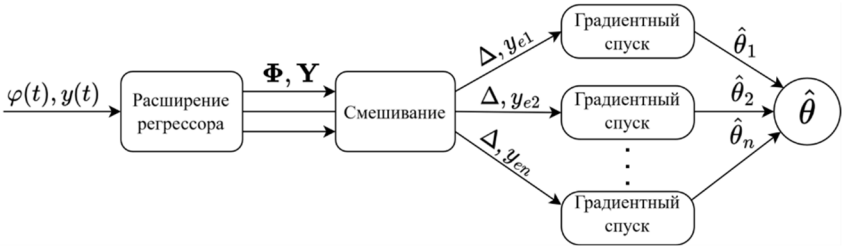


Рисунок 2 — Принципиальная схема алгоритма DREM

Метод состоит из следующих последовательных шагов, схематически представленных на рисунке 2:

1. Построение расширенного регрессора $\boldsymbol{\Phi}(t)\equiv\boldsymbol{\Phi}\in\mathbb{R}^{n\times n}$ с помощью поочередного применения к регрессионному уравнению (15) линейных устойчивых операторов, либо используя альтернативные схемы расширения.
2. Приведение получившегося уравнения к набору скалярных регрессионных уравнений путем умножения обеих частей уравнения на союзную матрицу расширенного регрессора $adj(\boldsymbol{\Phi})$ и используя ее свойство: $adj(\boldsymbol{\Phi})\boldsymbol{\Phi}=|\boldsymbol{\Phi}|I_n$.
3. Полученные в результате скалярные регрессионные уравнения разрешаются для получения оценки посредством градиентного спуска или альтернативных подходов.

Эксперимент

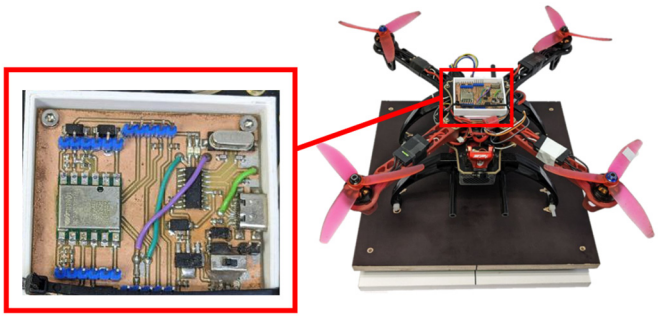


Рисунок 4 — Фотография стенда, использованного для проверки работоспособности алгоритма оценивания

На рисунке 3 представлен стенд, использованный для проверки теории. В качестве элементов винто-моторной группы использовались четыре мотора SunnySky X2206S-12 2100KV и трехлопастные пропеллеры 5x4. Источником питания использовался Li-Po аккумулятор емкостью 4200 мА·ч. В качестве ESC использовались BLHeli 20a с протоколом управления DSHOT600. Для получения данных о магнитном поле окружающего пространства и угловых скоростях использовался БИНС WitMotion WT901B на базе MPU9250 с 16-битным АЦП и разрешением 1.5мГаусс/бит с частотой обновления выдаваемой информации 200 Гц. В качестве системы управления и логирования команд управления моторами использовалась система реального времени INAV с частотой логирования 1000 Гц.

Первоначально с помощью стенда было проверено утверждение (7), предполагающее наличие прямо пропорциональной зависимости между скоростью вращения винта и управляющей команды. Полученная зависимость представлена на рисунке 4. Также на рисунке представлены аппроксимирующие прямо-пропорциональная и линейные зависимости, с R^2-коэффициентами равными 0.93 и 0.98 соответственно.

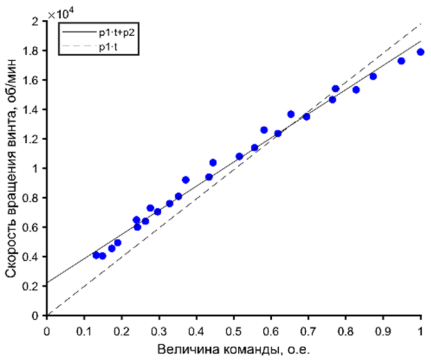


Рисунок 5 — Измеренная зависимость скорости вращения винтов от величины команды. Сплошной линией представлена аппроксимация данных пропорциональной зависимостью, пунктирной линией – линейной

Для обоснования целесообразности реализации адаптивного наблюдателя был проведен эксперимент с поддержанием фиксированной скорости вращения встроенными в полетный контроллер средствами, компенсирующими падение напряжения аккумулятора в соответствие с формулой (3). Контроль выполнения задачи осуществлялся посредством тахометра. Полученные зависимости относительной команды управления мотором и напряжения аккумулятора от времени представлены на рисунке 6.

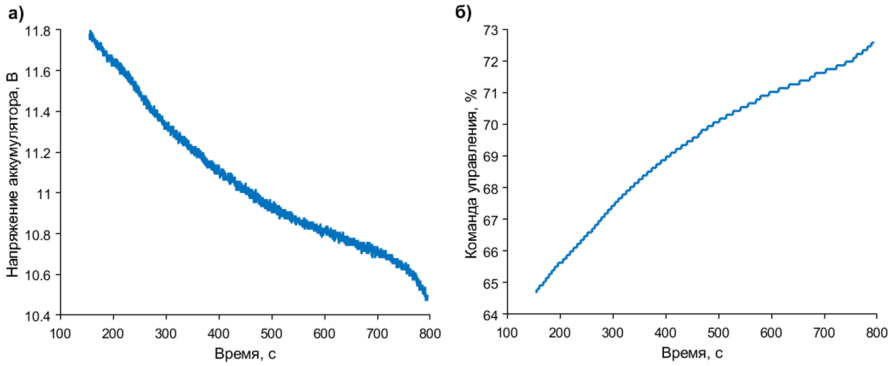


Рисунок 6 — Компенсация падения напряжения системой управления полетного контроллера для поддержания постоянной частоты вращения винта. а) Напряжение аккумулятора; б) Относительная команда управления

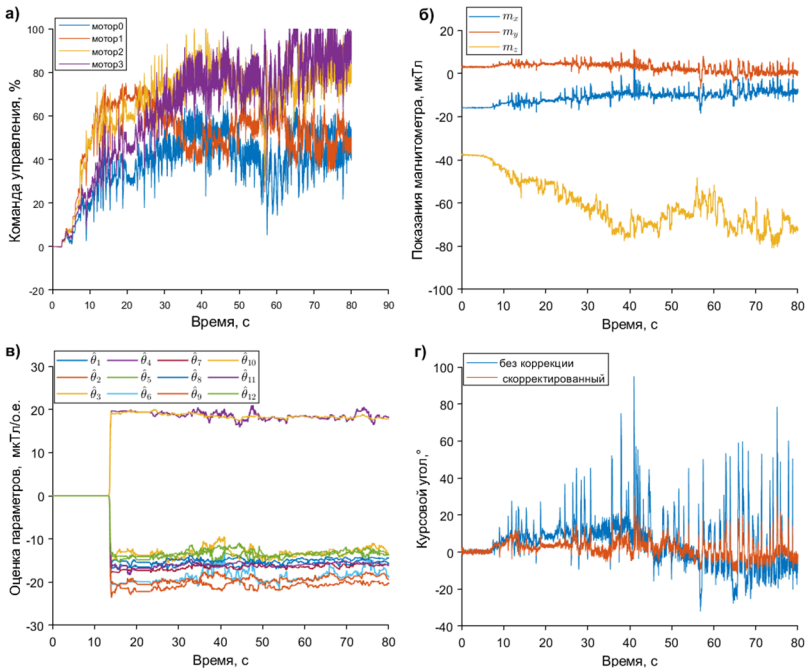


Рисунок 7 — Коррекция вычисления угла курса в статике: а) команды управления моторами; б) показания магнитометра; в) результаты оценки параметров; г) вычисленный угол курса.

Для проведения экспериментов была проведена калибровка магнитометра средствами настройки БИНС по принципу аппроксимации эллипса и верифицирована на стенде с размеченными ортогональными линиями.

Далее был произведен эксперимент с коррекцией измеренного курсового направления с использованием оценки значений искомых параметров Θ на статичной поворотной платформе методом DREM с использованием схемы расширения Крессельмейера [14] и градиентного спуска (16). Параметр фильтрации в формуле (14) использован со значением $\lambda = 50$. Управляющие команды моторов предварительно фильтрованы с частотой фильтрации 50 Гц. Графики команд управления моторами, показания магнитометра, результаты оценки параметров и скорректированный с учетом оценки возмущений угол курса приведены на рисунках 7а, 7б, 7в и 7г соответственно.

Для расчета углового положения использовалась формула

$$\begin{aligned} \vec{m} &= R_{PR}\vec{v} \\ \psi &= -\operatorname{atan2}(m_y, m_x) \end{aligned} \tag{17}$$

где $\vec{m}$ – вектор измерений магнитометра, повернутый в горизонтальную плоскость, m_x, m_y – элементы вектора $\vec{m}$, ψ – угол курса, R_{PR} – матрица поворота, полученная с помощью углов крена и тангажа по данным БИНС. Для вычисления скорректированного значения угла курса в (17) вместо $\vec{v}$ использовалось выражение (18):

$$\vec{v}_{\text{корр}} = \vec{v} - \sum_i \delta_i{}^2 \hat{\theta}_i \tag{18}$$

Максимальная ошибка и среднеквадратичное отклонение (СКО) при варьируемой команде занесены в таблицу 1.

Таблица 1 — Результаты эксперимента по коррекции показаний курса в статике

Параметр	**Без коррекции**	**С коррекцией**
Максимальное отклонение, °	91.0	29.0
СКО, °	9.0	4.2

Далее был проведен эксперимент по оценке сходимости алгоритма в условиях изменяющихся значений угловой скорости путем вращения стенда на одноосевой поворотной платформе.

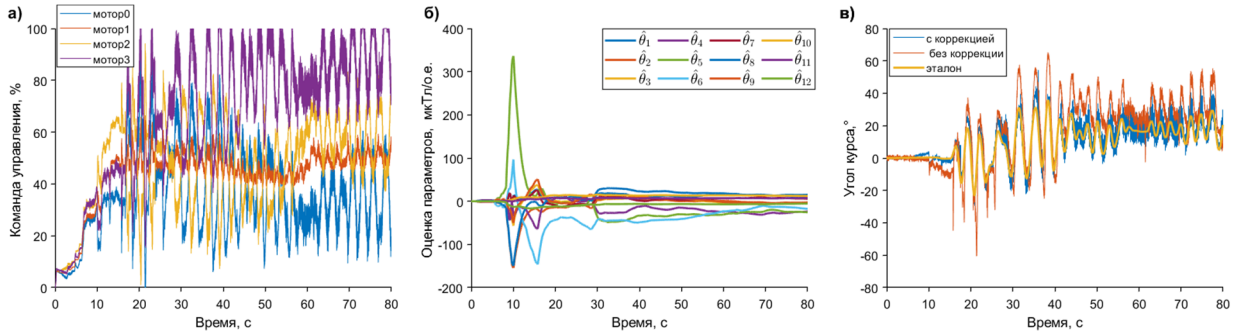


Рисунок 8 — Коррекция вычисления угла курса в динамике: а) команды управления моторами; б) результаты оценки параметров; в) вычисленный угол курса

Полученные в динамике значения сравнены с референсным значением, полученным по данным БИНС, результаты представлены на рис. 8. Максимальная ошибка и СКО относительно референсного значения, полученные в результате эксперимента, представлены в таблице 2.

Таблица 2 — Результаты эксперимента по коррекции показаний угла курса в динамике

Параметр	**Без коррекции**	**С коррекцией**
Максимальное отклонение, °	31.0	14.0
СКО, °	6.0	3.4

Заключение

Результате работы экспериментально подтверждена возможность частичной компенсации возмущений показаний магнитометра, вызванных воздействием токов силовой электроники БПЛА. Применение метода динамического расширения регрессора и смешивания к задаче оценивания параметров этих возмущений обеспечило снижение максимальной ошибки определения угла курса с 91° до 29° в случае статичного расположения носителя на земле, и с 31° до 14° для эксперимента с коптером на вращающейся платформе. СКО в обоих экспериментах также был снижен: с 9.0° до 4.2° в статике и с 6.0° до 3.4° в динамическом эксперименте.

Литература

1. Aranovskiy S., Bobtsov A., Ortega R., Pyrkin A. Performance enhancement of parameter estimators via dynamic regressor extension and mixing // IEEE Transactions on Automatic Control. – 2016. – Т. 62, №7. – С. 3546-3550.
2. Metge J., Megret R., Giremus A., Berthoumieu Y., Mazel C. Dynamic magnetic field compensation for micro UAV attitude estimation // 2013 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). – 2013. – С. 725-733.
3. Czyba R., Janusz W., Szafrański G. Compensation of magnetometers error based on nonlinear models for multimotor aerial robots applications // 2014 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). – IEEE, 2014. – С. 885-889.
4. Troni G., Whitcomb L. L. Adaptive Estimation of Measurement Bias in Three-Dimensional Field Sensors with Angular Rate Sensors: Theory and Comparative Experimental Evaluation // Robotics: Science and Systems. – 2013.
5. Pesterev A. V., Morozov Y. V., Matrosov I. V., Ashjaee J. Estimation of the magnetic field generated by UAV in flight // 2018 25th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS). – IEEE, 2018. – С. 1-4.
6. Silic M., Mohseni K. Correcting current-induced magnetometer errors on UAVs: An online model-based approach // IEEE Sensors Journal. – 2019. – Т. 20, №2. – С. 1067-1076.
7. Vasconcelos J. F., Elkaim G., Silvestre C., Oliveira P., Cardeira B. Geometric approach to strapdown magnetometer calibration in sensor frame // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. – 2011. – Т. 47, №2. – С. 1293-1306.
8. Li X., Li Z. A new calibration method for tri-axial field sensors in strap-down navigation systems // Measurement Science and Technology. – 2012. – Т. 23, №10. – С. 105105.
9. Сивухин Д. В. Общий курс физики. – Т. III. Электричество. – 4-е изд. – М.: ФИЗМАТЛИТ, Изд-во МФТИ, 2009. – 656 с.
10. Szafranski G., Czyba R., BŁachuta M. Modeling and identification of electric propulsion system for multirotor unmanned aerial vehicle design // 2014 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). – IEEE, 2014. – С. 470-476.
11. Morbidi F., Cano R., Lara D. Minimum-energy path generation for a quadrotor UAV // 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). – IEEE, 2016. – С. 1492-1498.
12. Buckingham E. XV. Dimensional analysis // The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science. – 1924. – Т. 48, №283. – С. 141-145.
13. Morse A. Global stability of parameter-adaptive control systems // IEEE Transactions on Automatic Control. – 1980. – Т. 25, №3. – С. 433-439.
14. Korotina M., Aranovskiy S., Ushirobira R., Vedyakov A. On parameter tuning and convergence properties of the DREM procedure // 2020 European Control Conference (ECC). – IEEE, 2020. – С. 53-58.

Информация об авторах

Михальков Никита Владимирович, аспирант, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО» (Университет ИТМО), Россия, 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49, лит. А, nvmikhalkov@itmo.ru

Пыркин Антон Александрович, профессор, д.т.н., декан, профессор, в.н.с., Университет ИТМО, Россия, 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49, лит. А, pyrkin@itmo.ru, ORCID: 0000-0001-8806-4057

Альтернативные способы автономной навигации БАС в условиях отсутствия сигналов спутниковых навигационных систем

М.Е. Данилин, О.П. Меньшиков, К.Р. Ахтямов✉, И.И. Инин, К.Н. Юсупова
Общество с ограниченной ответственностью «АВАНТИ-СОФТ» (ООО «АВАНТИ-СОФТ»), г. Иннополис, Республика Татарстан, Россия, ahtyamovgk@gmail.com

Аннотация
В статье рассматриваются альтернативные методы автономной навигации для беспилотных авиационных систем (БАС) в условиях отсутствия спутниковых сигналов. Основное внимание уделено трем методам: навигации по ARUCO-маркерам, визуальной одометрии и ультразвуковой навигации. Данные технологии позволяют повысить надежность и точность позиционирования БАС в сложных условиях эксплуатации, особенно в местах с ограниченным доступом к спутниковым системам. Эти методы также интегрированы в образовательные программы для обучения навыкам автономной навигации.

Ключевые слова
Автономная навигация, беспилотные авиационные системы, ARUCO-маркеры, визуальная одометрия, ультразвуковая навигация, отсутствие спутниковых сигналов, точное позиционирование, образовательные программы.

Alternative methods of autonomous navigation of UAS in the absence of signals from satellite navigation systems

Maksim E. Danilin, Oleg P. Menshikov, Kamil R. Akhtyamov✉, Igor I. Inin, Christina N. Yusupova
«Avanti-Soft» LLC, Innopolis, Republic of Tatarstan, Russia, ahtyamovgk@gmail.com

Abstract
The article discusses alternative autonomous navigation methods for unmanned aerial systems (UAS) in the absence of satellite signals. The focus is on three main methods: ARUCO marker-based navigation, visual odometry, and ultrasonic navigation. These technologies enhance the reliability and accuracy of UAS positioning in challenging operational environments, especially in areas with limited satellite access. These methods are also integrated into educational programs for teaching autonomous navigation skills.

Key words
Autonomous navigation, unmanned aerial systems, ARUCO markers, visual odometry, ultrasonic navigation, absence of satellite signals, precise positioning, educational programs.

Беспилотные авиационные системы (БАС) играют важную роль в современном мире и предоставляют возможности для выполнения множества задач, таких как мониторинг окружающей среды, доставка товаров, проведение разведывательных операций и многое другое. Однако для эффективного выполнения своих функций БАС необходимо обеспечить надежную и точную навигацию, особенно при выполнении автономных полетов. Однако эффективное использование БАС для выполнения автономных задач невозможно без точной и надежной навигации. В большинстве случаев, автономная навигация реализуется посредством использования спутниковых навигационных систем, таких как ГЛОНАСС (Глобальная навигационная спутниковая система) и GPS (Глобальная система позиционирования). Несмотря на практическую пользу и удобство использования спутниковых навигационных систем, в современных реалиях существует ряд факторов, существенно ограничивающих их использование в решении задач автономной навигации [1].

Одним из ключевых недостатков использования ГЛОНАСС и GPS является уязвимость к помехам и намеренное подавление спутниковых сигналов. К примеру, враждебные силы могут преднамеренно создавать помехи, препятствующие адекватной обработке спутниковых сигналов. Даже если не брать в расчет умышленное подавление сигналов, существуют природные явления (табл. 1) и техногенные факторы (табл. 2), способные ослабить, исказить или заблокировать сигналы спутников. Также важно учитывать, что в условиях плотной городской застройки, в густом лесу или в горах сигналы спутниковых навигационных систем будут отражаться или блокироваться, что значительно ухудшит качество сигнала и точность позиционирования.

В связи с этими ограничениями возникает потребность в разработке альтернативных методов автономной навигации, которые могут обеспечить надежность и точность даже в условиях отсутствия или ухудшения качества спутниковых сигналов. В данной работе подробно рассматриваются три метода: автономная навигация по ARUCO-маркерам, визуальная одометрия и использование системы ультразвуковой навигации. Перечисленные методы представляют собой лишь малую часть доступных подходов для автономной навигации. Они были выбраны, поскольку именно с этими методами наша компания накопила значительный опыт

работы, и на их основе строится обучение навыкам автономной навигации в образовательных учреждениях, которым поставляются произведенные нашей компанией БАС.

Таблица 1 — Воздействие природных явлений на распространение сигналов спутниковых систем

Природное явление	Описание воздействия
Ионосферные возмущения	Заряженные частицы в ионосфере, часто под влиянием солнечной активности, могут изменять путь радиоволн, используемых спутниками, вызывая их отражение, поглощение или сдвиг фаз.
Магнитные бури	Вызванные солнечными вспышками, магнитные бури влияют на электромагнитные поля Земли, нарушая структуру спутниковых сигналов, особенно в полярных регионах.
Осадки	Сильный дождь может значительно ослабить спутниковые сигналы на высоких частотах, что приводит к затуханию сигнала.
Водяной пар и облачность	Высокая влажность или плотные облака, особенно грозовые, могут снижать силу сигнала и вызывать задержки в передаче данных.
Молнии и грозы	Электромагнитные импульсы от молний создают радиопомехи, влияя на работу спутниковых систем связи и навигации.
Тропосферные возмущения	Турбулентность в атмосфере, особенно в тропосфере, может изменять распространение радиоволн, вызывая флуктуации сигнала.
Солнечное затмение	Изменения уровня солнечной радиации во время затмения влияют на ионосферу, что временно нарушает движение спутниковых сигналов

Таблица 2 — Воздействие техногенных факторов на распространение сигналов спутниковых систем

Техногенный фактор	Описание воздействия
Радиочастотные помехи	Наземные источники, такие как телекоммуникационные вышки, радиостанции и беспроводные устройства, могут работать на тех же частотах, что и спутники, создавая помехи.
Неправильное использование частотного диапазона	Несанкционированное или неправильное использование радиочастот, выделенных для спутников, может ухудшать качество связи.
Электромагнитные помехи от наземных объектов	Промышленные объекты, такие как электростанции и заводы, генерируют электромагнитные поля, которые могут искажать спутниковые сигналы.
Помехи от других спутников	С ростом числа спутников на орбите возрастает вероятность интерференции сигналов между спутниками.
Городская застройка	Высокие здания могут блокировать или отражать спутниковые сигналы, создавая многолучевую интерференцию и снижая качество связи.
Неправильное или неисправное оборудование	Неисправные антенны или передатчики могут создавать помехи для других спутниковых систем.

Автономная навигация с использованием ARUCO-маркеров позволяет выполнять автономные задачи в условиях отсутствия сигналов от спутников, обеспечивая при этом высокую точность определения положения беспилотного летательного аппарата (БПЛА) в пространстве. Благодаря контрастному дизайну и характерной геометрической форме ARUCO-маркеры легко распознаются камерой даже под довольно большим углом. Каждый ARUCO-маркер содержит в себе закодированный идентификатор, что дает возможность задать последовательность действий БАС для каждого идентификатора. Использование данной технологии позволяет проводить посадку БПЛА с высокой точностью и обеспечивает навигацию в сложных условиях, когда отсутствуют сигналы ГЛОНАСС и GPS [1, 2].

В рамках деятельности нашей компании был реализован алгоритм приземления дрона на движущуюся платформу. Алгоритм автоматической посадки беспилотной авиационной системы (БАС) на движущуюся платформу с использованием ARUCO-маркеров включает несколько последовательных этапов. После автоматического взлета БАС осуществляет стабилизацию на заданной высоте и удержание текущей позиции. Система использует камеру, направленную вниз, для анализа визуальной информации и обнаружения искомого ARUCO-маркера, расположенного на верхней части движущейся наземной платформы. Как только ARUCO-маркер попадает в зону видимости камеры, активируется режим сопровождения объекта интереса. БАС начинает позиционирование таким образом, чтобы центр его корпуса находился точно над центром ARUCO-маркера. Одновременно алгоритм запускает процесс плавного снижения, что позволяет БАС синхронно двигаться с платформой, сохраняя устойчивое положение относительно маркера и выполняя точное приземление на движущуюся цель. Этот алгоритм демонстрирует один из примеров использования ARUCO-маркеров, обеспечивая точную посадку в условиях движения цели. Помимо этого, ARUCO-маркеры успешно применяются для построения маршрутов и навигации по полю ARUCO-маркеров (рис. 1). Данный подход позволяет реализовать автоматический полет БАС по заранее заданной траектории, что особенно полезно при решении задач в условиях, где спутниковая навигация недоступна или нестабильна.

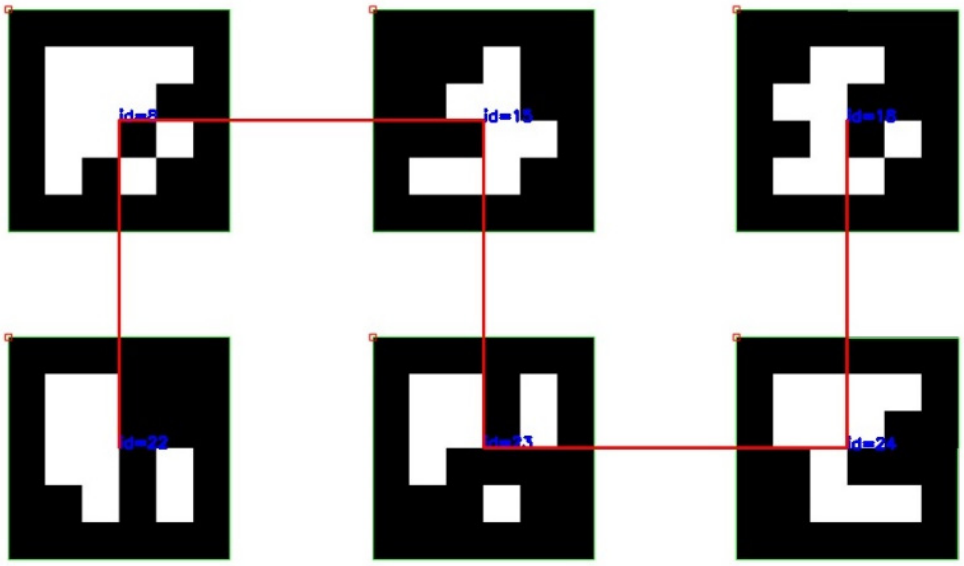


Рисунок 1 — Пример маршрута полета БАС по полю ARUCO-маркеров

Визуальная одометрия (ВО) является методом определения положения и перемещения объекта в пространстве на основании анализа последовательности кадров, полученных из видеопотока. В каждом кадре выделяются ключевые точки и объекты и на основе их смещений определяется положение БАС, его траектория и скорость. В дополнение к этому, с помощью ВО производится создание карт местности, при этом БПЛА продолжает определять себя в пространстве. Однако не стоит забывать, что для корректной работы данного метода в кадре должно содержаться достаточно визуальной информации (особенности местности, постройки и т.п.). Даже с учетом того, что ВО может использоваться как самостоятельный метод для автономной навигации БАС, лучше всего использовать визуальную одометрию совместно с другими методами навигации или совместно с системами БПЛА, например, с инерциальным измерительным блоком (IMU) [2, 3].

В нашей реализации визуальной одометрии используется карта, сгенерированная с помощью искусственного интеллекта (рисунок 2) и привязанная к реальным географическим координатам, для точного позиционирования БАС. Карта загружается на микрокомпьютер, установленный на БАС. Анализируя текущие изображения, микрокомпьютер сопоставляет ключевые точки на карте с теми, что видны в реальном времени, и на основе совпадений вычисляет положение БАС. Такой метод позволяет не только определить текущую позицию дрона, но и его ориентацию относительно карты, что эквивалентно определению ориентации БАС по курсу (YAW) с использованием GPS. Благодаря привязке карты к реальным координатам и возможности определения ориентации дрон точно определяет своё местоположение и направление в пространстве, что позволяет обходиться без спутниковой навигации в условиях сложного ландшафта или повышать точность позиционирования при слабом спутниковом сигнале.

Одним из новых и перспективных методов считается использование ультразвуковой системы навигации. Принцип работы ультразвуковой навигации основан на использовании ультразвуковых маяков, которые работают на прием или передачу звуковых волн высокой частоты (19кГц и выше). Несколько маяков настраиваются на прием ультразвуковых сигналов, как стационарные. Они устанавливаются на необходимой высоте (БПЛА не должен взлетать выше стационарных маяков), при этом полетная зона, создаваемая стационарными маяками, должна быть пустой – без объектов, препятствующих движению ультразвука. Мобильный же маяк, устанавливаемый на БПЛА, настраивается на передачу ультразвуковых волн, принимать которые будут стационарные маяки. Таким образом, зная расположение стационарных маяков и изменение относительно них мобильного маяка на БПЛА, производится эмуляция спутникового навигационного поля. Данный метод не может сравниться с GPS и ГЛОНАСС по площади покрытия, однако без проблем работает как внутри помещения, так и снаружи.

При реализации метода позиционирования по ультразвуковой навигации наша компания провела успешные испытания в условиях закрытого помещения. На дрон был установлен мобильный ультразвуковой маяк, интегрированный в автопилот. Он отслеживает свое положение относительно четырех стационарных маяков, закрепленных на стенах и эмулирующих спутниковую сеть. Эксперимент продемонстрировал, что система обеспечивает точность позиционирования, по точности опережающую GPS и ГЛОНАСС. Погрешность вычисления позиции дрона составляет ±2 см при максимально возможной дистанции в 25 метров между соседними стационарными маяками, при этом навигация остаётся стабильной и надежной. На открытой местности максимально возможная дистанция увеличивается до 30 метров. Однако корректная работа требует соблюдения условий прямой видимости между маяками и ограничения высоты, поскольку ультразвуковые волны блокируются объектами, и любые преграды могут снижать точность позиционирования.

Рисунок 2 — Сгенерированная карта с выделенными ключевыми точками

Спутниковые навигационные системы, несмотря на их широкое распространение и важность, имеют существенные ограничения в современных условиях. Это подталкивает к поискам альтернативных методов автономной навигации для беспилотных авиационных систем. Автономная навигация по ARUCO-маркерам, визуальная одометрия и использование системы ультразвуковой навигации представляют собой перспективные подходы, которые могут значительно повысить шансы на успешное выполнение задач автономной навигации БАС.

Эти технологии не только дополняют спутниковую навигацию, но и позволяют беспилотным системам успешно функционировать в тех условиях, где спутниковые системы оказываются недостаточными или недоступными. Внедрение и развитие таких методов автономной навигации является ключевым шагом к созданию более совершенных и независимых беспилотных систем, способных эффективно выполнять задачи в самых сложных и неблагоприятных условиях.

Литература

1. Arafat M.Y., Alam M.M., Moh S. Vision-Based Navigation Techniques for Unmanned Aerial Vehicles: Review and Challenges // Drones, vol. 7, art. 89, 2023. https://doi.org/10.3390/drones7020089

2. Lebedev I., Erashov A., Shabanova A. Accurate Autonomous UAV Landing Using Vision-Based Detection of ArUco-Marker // Interactive Collaborative Robotics. Fifth International Conference, ICR 2020, St Petersburg, Russia, October 7-9, 2020, Proc. Book «Lecture Notes in Computer Science», vol. 12336, 2020. Springer International Publishing Switzerland. 2020. pp. 179-188. https://doi.org/10.1007/978-3-030-60337-3_18.

3. Aqel M.O.A., Marhaban M.H., Saripan M.I. Review of visual odometry: types, approaches, challenges, and applications // SpringerPlus, vol. 5, art. 1897, 2016. https://doi.org/10.1186/s40064-016-3573-7.

Информация об авторах

Данилин Максим Евгеньевич, директор, общество с ограниченной ответственностью «АВАНТИ-СОФТ» (ООО «АВАНТИ-СОФТ»), Россия, Республика Татарстан, 420500, г. Иннополис, ул. Университетская, д. 7, пом. 602, а/я № 16, danilin.m@avgr.tech

Меньшиков Олег Павлович, начальник методического центра, ООО «АВАНТИ-СОФТ», Россия, Республика Татарстан, 420500, г. Иннополис, ул. Университетская, д. 7, пом. 602, а/я № 16, metod@avgr.tech

Юсупова Кристина Николаевна, заместитель начальника методического центра, о ООО «АВАНТИ-СОФТ», Россия, Республика Татарстан, 420500, г. Иннополис, ул. Университетская, д. 7, пом. 602, а/я № 16, metod@avgr.tech

Ахтямов Камиль Рашитович, программист, ООО «АВАНТИ-СОФТ», Россия, Республика Татарстан, 420500, г. Иннополис, ул. Университетская, д. 7, пом. 602, а/я № 16, ahtyamovgk@gmail.com

Инин Игорь Игоревич, начальник отдела передового программирования и информационных систем, ООО «АВАНТИ-СОФТ», Россия, Республика Татарстан, 420500, г. Иннополис, ул. Университетская, д. 7, пом. 602, а/я № 16, fiz.fill@mail.ru

Применение роботизированного комплекса в управлении дорожным движением

Д.С. Букатов, А.Ю. Недякин✉
Военная академия материально-технического обеспечения им. генерала армии А.В. Хрулева (ВА МТО), Санкт-Петербург, Россия, nedyakin82@mail.ru

Аннотация
Тенденции в развитии автоматизированных систем управления дорожного движения все активнее подчеркивает востребованность создания и использования таких же систем управления в вооруженных силах при планировании и движении воинских колонн. В статье представлен вариант робототехнического комплекса управления дорожным движением, применение которого на сети военно-автомобильных дорог позволит повысить эффективность управления воинским движением, рассмотрен его состав и варианты применения.

Ключевые слова
Управление, дорожное движение, военно-автомобильная дорога, роботизированный комплекс.

Automation of traffic management

Dmitriy S. Bukatov, Alexey Yu. Nedyakin✉
Military Academy of Logistics named after General of the Army A.V. Khrulev, St. Petersburg, Russia, nedyakin82@mail.ru

Abstract
Trends in the development of automated traffic control systems increasingly emphasize the need for the creation and use of the same control systems in the armed forces when planning and moving military columns. The article presents a variant of a robotic traffic control system, the use of which on a network of military highways allows to increase the efficiency of military traffic control, its composition and application options are considered.

Key words
Control, traffic, military highway, robotic complex.

В настоящее время для управления транспортными потоками на автомобильных дорогах все большее применение находят автоматизированные системы управления дорожным движением (АСУДД), представляющие собой комплекс технических средств, реализующий определенные технологические алгоритмы управления транспортными потоками. Мировой опыт показывает, что применение АСУДД является наиболее эффективным методом разрешения постоянно усложняющихся дорожно-транспортных ситуаций [1]. Целью АСУДД является: сокращение времени задержек и числа остановок транспортных средств, увеличение скорости движения, предотвращение заторов; обеспечение приоритетного пропуска некоторых видов транспорта.

Использование АСУДД в решении задач по обеспечению эффективной и устойчивой работы автомобильного транспорта в военное время будет затруднено, а местами невозможно, так как противник будет воздействовать по объектам транспортной инфраструктуры, что повлечет вывод из строя технических средств АСУДД.

Изменение характера вооруженной борьбы в современных условиях, возрастание объемов и сложности воинских перевозок, сокращение времени на принятие решений в быстро меняющейся обстановке требует дальнейшего совершенствования системы управления воинским движением на военно-автомобильных дорогах (ВАД). Массовое применение высокоточного оружия (ВТО), FPV-дронов оказывает существенное влияние, как на транспортные потоки, так и на дорожную сеть ВАД в целом. Современная операция не может быть успешно осуществлена без четкой и хорошо налаженной работы транспорта, обеспечивающего выполнение массовых воинских перевозок. В целях обеспечения безопасности воинского движения важно исключить воздействие противника по скоплениям транспортных средств на участках ВАД с ограниченной пропускной способностью, барьерных рубежах.

Основными мероприятиями, осуществляемыми дорожными войсками для решения этой задачи, являются четкая организация движения, предусматривающая распределение движения по основным, запасным маршрутам ВАД и объездам, направление движения в районы ожидания, мероприятия по регулированию движения на участках ВАД с ограниченной пропускной способностью, оперативное восстановление разрушенных участков ВАД, а также защита, охрана, оборона маскировка колонн и объектов на ВАД. Имеющиеся в дорожных войсках технические средства управления движением не позволяют решать вопросы обеспечения безопасности воинского движения оперативно. Даже при наличии личного состава для выставления постов регулирования на участках ВАД с ограниченной пропускной способностью, их обходах, въездах и выездах с мостов в районы и из районов ожидания исключить скоплений техники и установить четкую организацию движения на этих участках невозможно. Причиной тому являются, с одной стороны – сложность в организации управления

каждым постом регулирования с одного диспетчерского пункта, с другой – отсутствие информации у начальников постов регулирования на каждом участке о состоянии военно-транспортных потоков в целом в районе. Они не обладают и не могут обладать в принципе всей необходимой информацией для принятия решения о прохождении колонн. Еще хуже будут обстоять дела при низкой квалификации должностных лиц дорожно-комендантской службы, постов регулирования и других органов управления движением на ВАД. Поэтому главным выходом и основным направлением повышения безопасности воинского движения на барьерных рубежах является разработка технических решений по автоматизации управления воинским движением на сети ВАД. Анализ имеющихся технических средств контроля и управления движением, передачи данных, их технико-эксплуатационных характеристик позволяет сделать вывод о том, что основу технических решений по автоматизированному управлению воинского движения на ВАД должны составить мобильные автоматизированные комплексы управления движением.

Одним из таких решений является разработка робототехнического комплекса управления дорожным движением (РТКУДД). Управление воинским движением с помощью РКУДД на сети ВАД позволит:

– существенно сократить время на принятие мер по недопущению заторов на поврежденных участках, барьерных объектах (мостах, эстакадах, тоннелях и т.д.) сети ВАД;
– экстренно запретить или разрешить движение на отельных участках ВАД;
– оперативно управлять воинским движением для пропуска приоритетных воинских колонн;
– сократить привлечение личного состава дорожно-комендантских подразделений для регулирования воинского движения на поврежденных объектах ВАД;
– повысить пропускную способность на поврежденных участках ВАД;
– в условиях применения FPV-дронов, действия ДРГ противника сохранить жизни и здоровье личного состава дорожно-комендантских подразделений.

Для создания РКУДД предлагается использовать научно-технические наработки по созданию робототехнических комплексов. Анализ имеющихся материалов показал, что в общем виде робототехнический комплекс включает в качестве основы робототехническое средство (РТС), составными частями которого, независимо от типа, назначения, особенностей исполнения являются модуль движения и модуль целевой нагрузки. Для управления РТС необходимо одновременно решать две существенно- различные, но взаимосвязанные задачи: управление движением (модуль управления движением) и управление целевой нагрузкой (модуль управления целевой нагрузкой). РТС и средства управления составляют робототехнический комплекс. При этом, в зависимости от реализованных алгоритмов управления, РТК может включать одно или несколько РТС (см. рис. 1) [2, 3].

Рисунок 1 — Робототехнический комплекс с несколькими робототехническими средствами

Активное развитие робототехники позволяет открывать новые возможности во многих областях, в том числе при управлении дорожным движением. Разработка РКУДД является перспективным направлением, так на всемирном полицейском саммите в Дубае представили светофор-квадрокоптер (см. рис. 2), основная задача которого помощь в управлении трафиком на загруженных дорогах с возможностью экстренного регулирования дорожного движения. Летающий регулировщик напечатан на 3D принтере. С его помощью можно моментально остановить или разрешить проезд транспортных средств [4].

Рисунок 2 — Беспилотный летающий светофор

Данный светофор-квадрокоптер можно взять, как прототип для разработки технических решений РТКУДД, который может состоять из модуля движения – беспилотного летательного аппарата (БПЛА), модуля целевой нагрузки - устройства несущего информацию водителю транспортного средства (светофор, электронный дорожный знак, громкоговоритель с проблесковыми маячками и т.д.) (см.рис.3). Комплекс может включать в свой состав видеокамеры (видимого и ИК диапазона), телевизионные приборы, анализаторы спектра радиационного состава окружающей среды.

Рисунок 3 — Варианты исполнения робототехнического комплекса управления дорожным движением

В качестве РТС целесообразно использовать БПЛА вертолётного типа (см. рис. 4.), подъемная сила у такого типа аппаратов создается за счет вращающихся лопастей несущего винта (винтов). Очевидными преимуществами БПЛА вертолетного типа являются способность зависания в точке над определенном местом, на заданной высоте.

Рисунок 4 — Варианты БПЛА вертолетного типа

Российская универсальная классификация БПЛА по летным параметрам и характеристикам (см. табл. 1), например, взлетной массе, дальности, высоте и продолжительности полета, размерам самих аппаратов и т.д. позволяет выбрать подходящий БПЛА для использования в качестве робототехнического средства [5].

Таблица 1 — Российская универсальная классификация БПЛА (тактические БПЛА)

Категория	Взлетная масса, кг	Дальность полета, км	Высота полета, м	Продолжительность полета, ч
Легкие (контроль авангарда)	25-150	10-30	3000	2-4
Легкие (малая дальность полета)	50-250	30-70	3000	3-6
Средние	150-500	70-200	5000	6-10
Средние (большая продолжительность полета)	500-1500	>500	8000	10-18
Маловысотные (проникновение)	250-2500	>250	50-9000	0,5-1
Маловысотные (большая продолжительность полета)	15-25	>500	3000	>24
Средневысотные (большая продолжительность полета)	1000-1500	>500	5000-8000	24-48

Управление модулем движения осуществляется с диспетчерского пункта управления, в ручном режиме, в автоматическом режиме и комбинированным способом. В ручном режиме оператор управляет комплексом с дистанционного пульта, такой режим позволяет организовывать работу в заранее неизвестных условиях и

большого количества непредсказуемых факторов (воздействие противника, погодные условия и т.д.). В автономном режиме блок автоматического управления принимает решения о траектории движения самостоятельно, согласно заложенной в него программе и показателям окружающей среды. Комбинированный режим управления предполагает сочетание автономного и ручного управления. Управление модулем целевой нагрузки осуществляется с диспетчерского пункта в ручном или в автоматическом режиме.

Для решения задач управления воинского движения возможно применение РКУДД, как одиночное, так и групповое.

Одиночное применение РКУДД могут взять на себя функции неподвижных постов регулирования воинского движения, которые выставляются, как правило, на все время эксплуатации военно-автомобильной дороги. Места их расположения определяются в ходе разведки дороги. Обычно это:

– пересечения и развилки дорог;
– перекрестки улиц в населенных пунктах;
– труднопроходимые участки дорог и участки с односторонним движением (у входа и выхода из них);
– объезды и съезды с дороги;
– крутые закрытые повороты;
– крутые и длинные спуски и подъемы;
– перевалы;
– проходы через заграждения, зараженные участки и другие места, где необходимо установить особый контроль за движением и предупреждать водителей об опасности.

В районах переправ через крупные водные преграды, участки дорог в зонах радиоактивного, химического, бактериологического заражения, заграждений и разрушений, пожаров возможно групповое применение РКУДД. Групповое применение РТКУДД позволит создать автономную систему управления воинским движением на сети ВАД, что существенно повысит их пропускную способность.

Возможности РКУДД позволяют применять его в экстренных случаях. Для выполнения задач по экстренному регулированию движения воинских колонн предусмотрен следующий вариант использования РКУДД, порядок применения которого показан на рисунке 3.

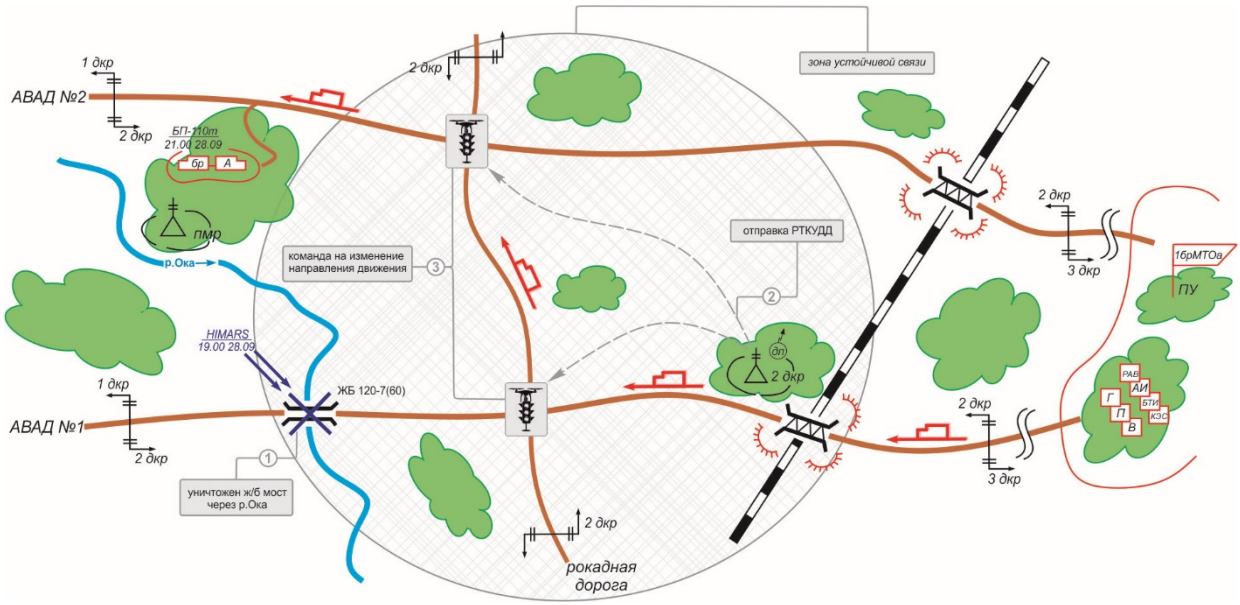


Рисунок 3 — Вариант применения РТКУДД

Создание и применение предложенных вариантов робототехнического комплекса управления дорожным движением позволит повысить эффективность управления движением на сети ВАД. Вместе с тем проведенный анализ научных работ по повышению эффективности управления воинского движения показал отсутствие научно-методического аппарата обоснования технических решений с применением робототехнических комплексов.

Таким образом, сложилось противоречие между практикой, признающей объективную необходимость повышения эффективности управления воинского движения за счет внедрения мобильных робототехнических средств управления и состоянием научно-методической базы технических решений. Поэтому разработка научно-методического аппарата обоснования технических решений по автоматизированному управлению воинского движения на сети ВАД с использованием робототехнических комплексов является актуальной научной задачей.

Литература

1. Чи Хаоюань. Автоматизированные системы управления дорожным движением на магистралях [Электронный ресурс] // Молодой ученый. — 2020. — № 23 (313). — С. 147-150. — URL: https://moluch.ru/archive/313/71282/ (дата обращения: 18.05.2024).
2. Воробьев А.А. Проблемы формирования облика специализированных робототехнических комплексов / А.А. Воробьев, В.В. Сергеев // Робототехника и техническая кибернетика. – Т. 9. - № 4. – СПб: ЦНИИ РТК. - 2021. – С. 65-86.
3. Ермолов И.Л., Хрипунов С.П. Проблемы группового применения робототехнических комплексов и пути их решения / Экстремальная робототехника. – 2018. – Т. 1. – № 1. – С. 279-285.
4. https://blog.eldorado.ru/publications/v-dubae-predstavili-bespilotnyy-letayushchiy-svetofor-na-vooruzhenie-mestnoy-politsii-40568 [Электронный ресурс] (дата обращения: 25.10.2024).
5. https://3mx.ru/articles/bpla-konstruktsiya-tipy-sfery-primeneniya [Электронный ресурс] (дата обращения: 29.10.2024).

Информация об авторах

Букатов Дмитрий Сергеевич, д.т.н., доцент кафедры «Автотранспортного и дорожного обеспечения», Военная академия материально-технического обеспечения им. генерала армии А.В. Хрулева (ВА МТО), Россия, 199034, Санкт-Петербург, Набережная Макарова, д. 8, dimonb1980@mail.ru

Недякин Алексей Юрьевич, адъюнкт отдела «Организации научной работы и подготовки научно-педагогических кадров», ВА МТО, Россия, 199034, Санкт-Петербург, Набережная Макарова, д. 8, nedyakin82@mail.ru

Моделирование динамики беспилотного планера и аэродинамики потока при удержании в набегающем потоке над клином

Н.А. Щур
Государственный научный центр Российской Федерации «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики» (ГНЦ РФ ЦНИИ РТК), Санкт-Петербург, Россия, n.tschur@rtc.ru

Аннотация
При ветреной погоде часто можно наблюдать зависание птиц над некоторыми стационарными препятствиями и вблизи неоднородностей рельефа местности. Физической причиной реализуемости такого режима полёта является наклон вектора скорости потока к плоскости горизонта, при котором вертикальная составляющая скорости имеет положительное значение. В данной работе приводятся результаты моделирования управляемого полёта планера в наклонном встречном потоке над клином, с целью воспроизведения режима «зависания», аналогичного зависанию птицы. Показано, что для определённых параметров потока возможна выработка механической энергии винтовым двигателем планера, за счёт вращения винта набегающим потоком. Таким образом, для планера с электродвигателем, работающим также в режиме генератора, результаты расчётов при ветре достаточной силы показывают наличие режимов полёта, когда возможна зарядка аккумуляторной батарей.

Ключевые слова
Планер, воздушный беспилотник, моделирование управляемого движения, рулевые поверхности, деформируемые сетки, алгоритм деформации, сопряженный расчет, взаимодействие тела с потоком, вычислительная аэродинамика, режим зависания, рекуперация энергии встречного потока.

Благодарности
Результаты получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки Рос-сии № 075-00697-24-01 от 03.04.2024 г. «Исследование методов и разработка технологий создания отладочно-моделирующих комплексов для функционального и поведенческого моделирования РТК и групп РТК» (FNRG-2022-0008 1021051101732-4-1.2.1;2.2.2).

Simulation of the dynamics of an unmanned glider and flow aerodynamics when held in an incoming flow over a wedge

Nikolai A. Tschur
Russian state scientific center for robotics and technical cybernetics (RTC), St. Petersburg, Russia, n.tschur@rtc.ru

Abstract
In windy weather, you can often observe birds hovering, gliding over some stationary obstacles and near irregularities in the terrain. The physical reason for the feasibility of such a flight mode is the inclination of the flow velocity vector to the horizon plane, at which the vertical component of the velocity has a positive value. This paper presents the results of modeling the controlled flight of an aeroplane in an inclined oncoming flow over a wedge, in order to reproduce the “hovering” mode, similar to the hovering of a bird. It is shown that for certain flow parameters it is possible to generate mechanical energy by the plane's propeller engine due to rotation of the propeller by the oncoming flow. The calculation results show the presence of flight modes when it is possible to charge the batteries for a glider with an electric motor also operating as a generator.

Key words
Aeroplane, controlled motion modeling, control surfaces, deforming meshes, deformation algorithm, adjoint calculation, body-flow interaction, CFD, hovering mode, oncoming flow energy recovery.

Acknowledgements
The results were obtained within the framework of the state task of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation No. 075-00697-24-01 dated 03.04.2024 «Research of methods and development of technologies for creating debugging and modeling complexes for functional and behavioral modeling of RTK and RTK groups» (FNRG-2022-0008 1021051101732-4-1.2.1;2.2.2).

Введение

Важнейшей характеристикой воздушного беспилотника является время его активного полёта. Время полёта обычно ограничено запасом топлива, или емкостью АКБ. Хотя активный полёт беспилотника самолётного типа требует постоянных затрат энергии, но мощность, потребляемая двигательной установкой, может существенно зависеть от режима полёта. Например, известно, что при наличии стационарного потока воздуха с положительной вертикальной составляющей, птицы могут висеть в таком потоке, практически не тратя энергии. Часто такое висение можно наблюдать над препятствием, расположенным поперёк направления ветра. Автор наблюдал висение чаек над дамбой, ведущей от берега финского залива к острову Кронштадт. Ключевым условием возможности такого зависания для птиц является равенство угла наклона потока углу свободного планирования птицы в точке висения. Если самолётный планер также поместить в поток, угол наклона которого равен углу его планирования, а скорость равна скорости его планирования, то он также сможет висеть неподвижно.

При большем угле наклона потока процесс висения может сопровождаться вращением винтового двигателя набегающим потоком. При наличии электрической двигательной установки, способной работать в режиме генератора, возможна выработка электроэнергии в режиме зависания и подзарядка аккумуляторной батареи.

Наличие положительной вертикальной составляющей скорости потока обычно связано с локальной неровностью рельефа, или с наличием конвективных потоков от нагретой поверхности земли. Однако для восходящего конвективного потока горизонтальная скорость обычно не велика. При натекании скоростного горизонтального потока на препятствие в виде клина будет наблюдаться, как значительная горизонтальная скорость, так и существенная вертикальная составляющая. Именно такие условия максимально удобны для реализации режима висения и «подзарядки».

Постановка задач (физическая часть)

Для выяснения условий реализации режима зависания для планера в данной работе проводилось сопряженное моделирование динамики планера самолётного типа (рис.1) и аэродинамики воздушного потока. Аэродинамический расчёт даёт представление, как о неоднородности потока воздуха, натекающего на клин, так и об обтекании планера этим потоком и аэродинамических силах, действующих на него.

Планер представляет из себя самолёт классической схемы (рис. 1) размером 8Х10 метров и массой 250 кг. Полёт планера осуществляется над пологим клином с задачей удержания в заданной точке пространства над клином. На клин набегает поток воздуха со скоростью 20 м/с. Непосредственно над клином поток имеет заметную положительную вертикальную составляющую.

В ЦНИИ РТК разрабатывается методика сопряженного моделирования динамики подводных аппаратов и гидродинамики и гидродинамики обтекающей их жидкости (ссылка). В данной работе разработанная и апробированная методика была использована для моделирования динамики воздушного планера.

Для моделирования аэродинамики потока вблизи планера используются уравнения динамики жидкости на деформируемой сетке

$$\frac{d}{dt}\int_{\Omega}\rho d\Omega+\int_{S}\rho(\vec{v}-\vec{v}_b)\cdot\vec{n}dS=0 \qquad (1.1)$$

Уравнение неразрывности

Здесь $\vec{v}_b$ – это скорость граней деформируемой сетки

$$\frac{d}{dt}\int_{\Omega}\rho\vec{v}d\Omega+\int_{S}\rho\vec{v}\left((\vec{v}-\vec{v}_b)\cdot\vec{n}\right)dS=\int_{S}\left(\underline{\underline{\tau}}\cdot\vec{n}+p\vec{n}\right)dS+\int_{\Omega}\rho\vec{F}d\Omega \qquad 1.2$$

Уравнение баланса импульса

Для моделирования движения самого аппарата используются уравнения динамики твердого тела

$$\frac{\partial\vec{V}}{\partial t}=(\vec{F}^{imp}+\vec{F}^{fluid})/m_{dev}; \qquad (2.1)$$

баланс импульса

$$\underline{\underline{J}}^{dev}\cdot\vec{\varepsilon}=\vec{M}^{imp}+\vec{M}^{fluid}; \qquad (2.2)$$

баланс момента импульса

Для планера тензор моментов инерции имеет диагональный вид, что позволяет существенно упростить уравнение 2.2.

$$\frac{\partial\omega_i}{\partial t}=(M_i{}^{imp}+M_i{}^{fluid})/J_{ii}{}^{dev}; \qquad (2.3)$$

При реализации сопряженных расчётов использовалось разбиение расчётной области на три блока. Первый блок – это сферический блок вокруг планера, совершающий движение и вращение как твёрдое тело вместе с планером. Второй блок – это блок внешней области в форме параллелепипеда, в котором сетка деформируется в соответствии с текущим положением планера. Размер второго блока 1.5 км в длину и ширину и 400 м в высоту. Базовая сетка в этом блоке гексагональная с минимальной скошенностью ячеек. Третий блок – это блок, формирующий клин, который находится под вторым блоком и имеет неподвижную сетку. Клин имеет протяженность в 400 метров и высоту 100 метров. В начальный момент времени планер находится у верхней кромки клина. Третий блок потенциально позволяет быстро менять размеры и угол клина в задаче.

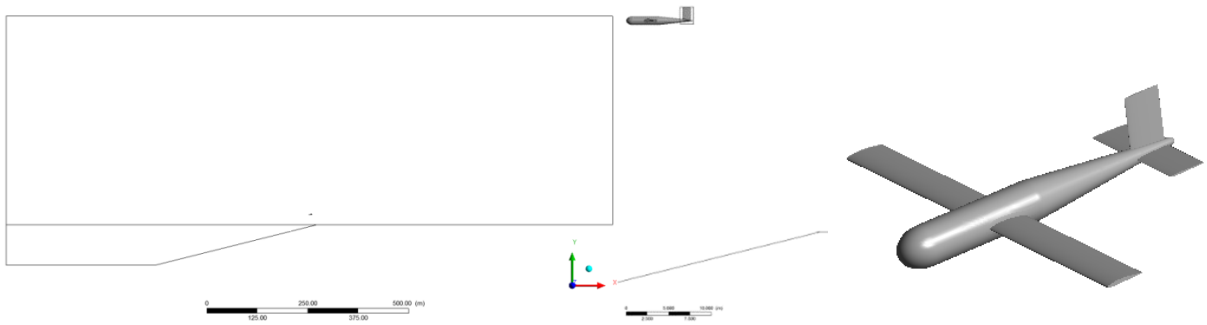


Рисунок 1 — Геометрия расчётной области и самолёта беспилотника

Постановка задач (система управления)

Управление движением планера происходит посредством работы алгоритма деформации, моделирующего поворот рулевых поверхностей на крыльях и рулевом оперении через изменение формы профиля крыла (рис. 2). Всего использовалось 5 рулевых поверхностей: две на основных крыльях, две на горизонтальном хвостовом оперении и одно на крыльях. Два руля на крыльях – это аналоги элеронов, используемые для управления креном. Два руля на горизонтальном хвостовом оперении используются для регулирования тангажа. Руль на киле используется для регулирования курса планера. Продольная скорость и положение планера поддерживаются тягой винтового двигателя, расположенного на носу планера.

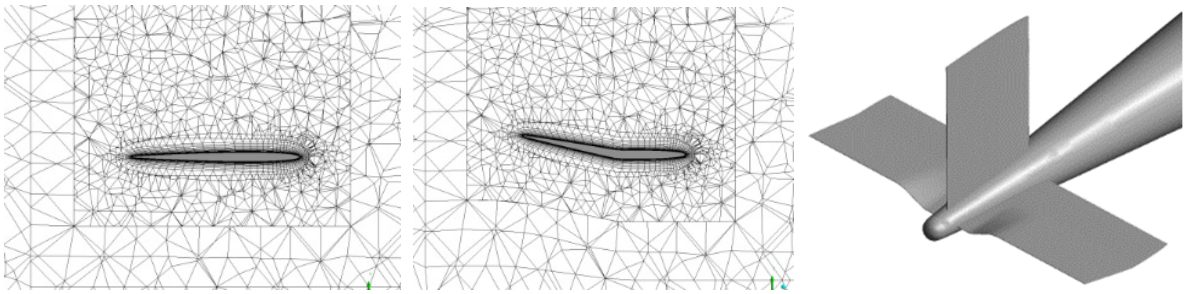


Рисунок 2 — Деформация рулевых поверхностей и расчётной сетки в гидродинамическом расчёте

Тяга двигателя моделируется в виде простой квадратичной зависимости от частоты оборотов винта. Для регулирования продольного смещения используется ПД регулятор частоты оборотов винтового двигателя. Для регулирования высоты используется двухуровневый регулятор высоты тангажом. Тангаж, в свою очередь, регулируется поворотом элеронов хвостового оперения (рис. 2). Для регулирования бокового смещения используется двухуровневый регулятор бокового смещения курсом. Курс, в свою очередь, регулируется поворотом рулевой поверхности киля с использованием ПД регулятора, по схеме аналогичной схеме регулирования тангажа. Крен, регулируется поворотом элеронов крыльев при помощи ПД регулятора с нулевым целевым креном.

Рисунок 3 — Регулятор высоты посредством изменения тангажа

Представленная схема регулирования позволяет удерживать планер в заданной точке пространства. В расчёте проводился эксперимент, когда регулятор удержания в точке пространства использовался постоянно, а координаты точки удержания менялись скачком в некоторый момент времени.

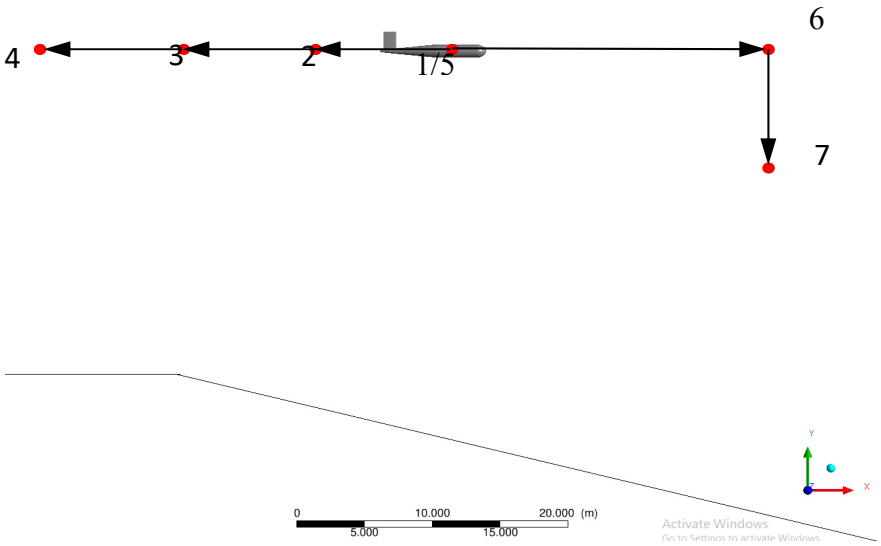


Рисунок 4 — Схема переключения точки удержания планера

Был составлен маршрут из набора точек для удержания планера (рис. 4) с переключением между этими точками через 10-20 секунд. При переходе из первой точки ко второй, третьей и четвёртой планер смещается каждый раз на 10 метров назад в продольном направлении. Затем точка удержания опять возвращается в центр координат (точка 1) и далее смещается вперёд ещё на 25 метров (точка 6), после чего опускается вниз на 10 метров. Стоит отметить, что маршрут был выбран исходя из предварительных данных о структуре потока над клином (рис. 6).

Результаты расчётов

Расчёты показали возможность удержания планера в точке, находящейся недалеко (порядка 2 метров) от заданной точки удержания. Однако со смещением от одной точки удержания к другой сразу возникли сложности. Скорость смещения планера назад в продольном направлении не должна быть высокой, так как это снижает скорость потока, натекающего на сам планер. При этом подъёмной силы на крыльях начинает не хватать для удержания высоты. Система управления, компенсируя нехватку подъёмной силы, значительно увеличивает угол тангажа, что приводит к неустойчивости полета и срыву планера в неуправляемые режимы. Чтобы предотвратить подобное развитие событий, задавалось высокое значение дифференциального коэффициента для регулятора продольного положения, что позволяло иметь продольную скорость планера не более 2 м/с по модулю. Графики изменения координат центра масс планера (рис. 5) в процессе расчёта показывают, что интервалов времени в 10 секунд обычно не совсем хватает для перемещения планера по продольной координате из одной точки удержания в другую. А вот смещение вниз выполняется довольно быстро. Однако основной цели расчёт достиг и планер побывал в разных точках потока над клином в условиях практически стационарного обтекания.

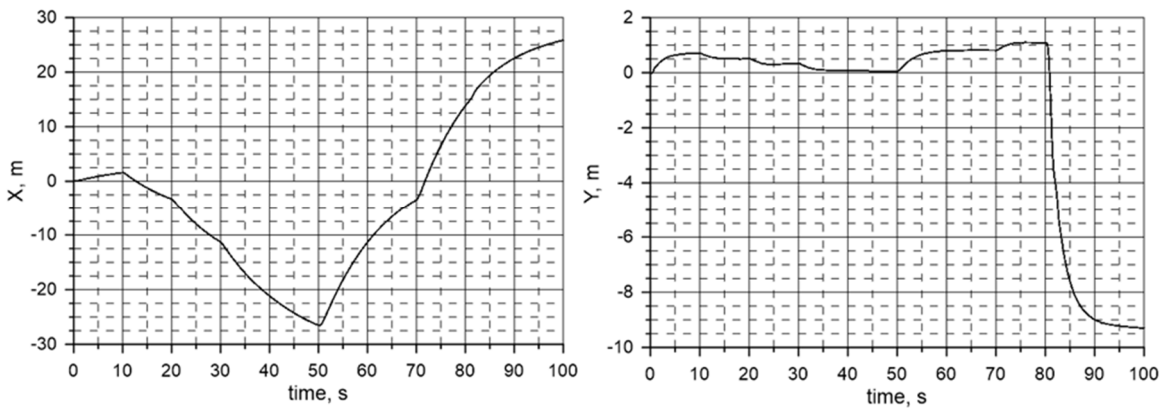


Рисунок 5 — Изменение продольной (слева) и вертикальной (справа) координаты в процессе расчёта

Точки маршрута движения планера попадают в участки потока над клином с разными скоростными характеристиками. В частности, в этих точках наблюдаются различные значения вертикальной составляющей скорости (рис. 6). От точки 1 к точке 4 вертикальная составляющая сильно падает. Потом возрастает к точке 6 и для точки 7 приобретает максимальное значение. Поле скорости также показывает, что планер вызывает значительную локальную неоднородность потока, вызванную взаимодействием потока с планером.

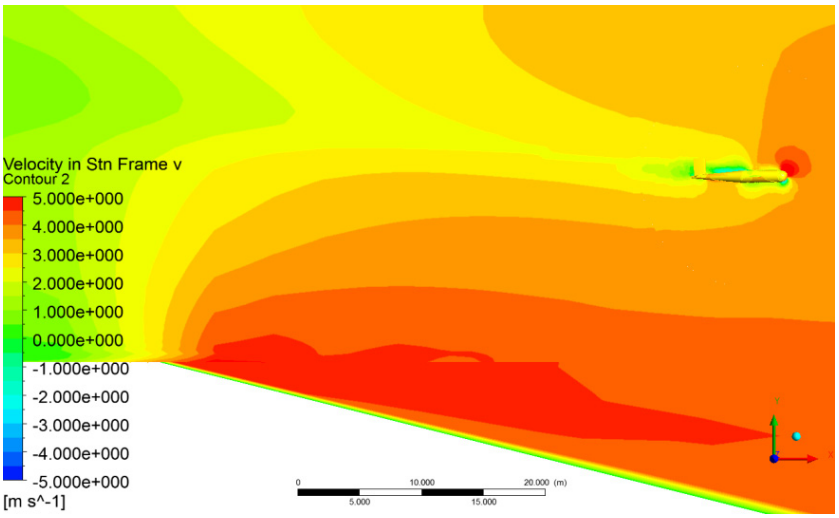


Рисунок 6 — Поле вертикальной составляющей скорости вблизи планера над клином при удержании в точке 7

Возможность выработки электроэнергии за счёт вращения винтового двигателя набегающим потоком в процессе зависания представляет из себя основной вопрос данного исследования. Данные о продольной тяге винтового двигателя (рис. 7б) в процессе движения по маршруту однозначно свидетельствуют о наличии такой возможности. В тех интервалах времени (выделено красным), где тяга имеет отрицательное значение, винтовой двигатель должен создавать дополнительное сопротивление, чтобы планер не улетел вперёд, а удерживался на месте. Для дополнительного сопротивления достаточно нулевой частоты вращения винта, а максимальное сопротивление будет наблюдаться для винта, вращаемого набегающим потоком при минимальном значении момента сопротивления. Можно использовать часть момента создаваемого набегающим потоком на винтовом двигателе для генерации электрической энергии, если электродвигатель будет работать в режиме генератора. Более того, меняя момент сопротивления генератора можно влиять на сопротивление винта и регулировать продольное положение планера.

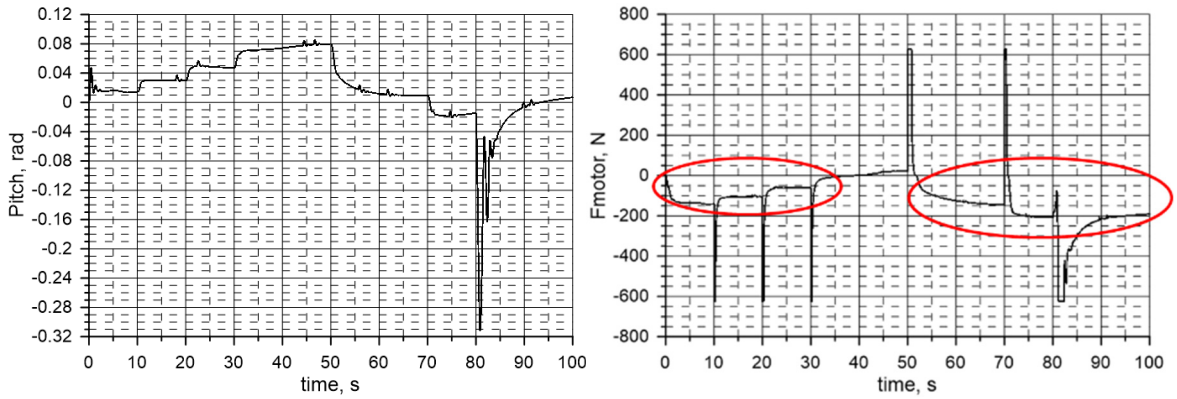


Рисунок 7 — Тангаж планера (слева) и сила (справа), создаваемая моделью винтового двигателя

Проведённые расчёты показали связь между тягой двигательной установки и локальными особенностями поля скоростей. Для исходной точки удержания наблюдается довольно большой угол наклона потока, поэтому планер вынужден увеличить тангаж на нос (рис. 7), чтобы сохранить высоту полёта. При увеличении тангажа на нос аэродинамические силы начинают толкать планер вперёд, так как поворот крыльев планера автоматически приводит к повороту вектора аэродинамической силы, таким образом, что его продольная составляющая становится больше нуля. При этом необходимо увеличить сопротивление планера, чтобы оставить висеть его неподвижно в одной точке. Сопротивление добавляется изменением режима работы винтового двигателя. На рисунке 7 показано, что связь между углом тангажа планера и сопротивлением достаточно однозначна при стремлении удержать планер в режиме зависания.

Заключение

Проведённые исследования демонстрируют возможность зарядки самолётных беспилотников в полёте при наличии ветра достаточной силы и соответствующего рельефа местности (высокого берега водоема и т. д.). Более того, такого рода подзарядку можно проводить в автоматическом режиме. Требуемая скорость ветра зависит от отношения массы аппарата к его площади и от аэродинамического качества. Расчёты также подтвердили возможность удержания в заданной точке за счёт использования указанного набора регуляторов. Существенным допущением представленных расчётов является возможность создавать сколь угодно большое сопротивление винтовым двигателем, что не совсем корректно. Сопротивление винтового двигателя ограничено в режиме подзарядки скоростью набегающего потока и его может не хватать для предотвращения смещения планера вперёд по потоку. Последующие исследования с моделированием обтекания винта позволят оценить важность этого ограничения.

Литература

1. Tschur N.A., Polovko S.A., Deulin A.A. Application of computational fluid dynamics methods to obtain characteristics of AUV transient processes // Robotics and technical cybernetics. — 2020 — Т. 8. № 4. — P. 287—295.

Информация об авторе

Щур Николай Алексеевич, к.ф.-м.н., математик, Государственный научный центр Российской Федерации «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики» (ГНЦ РФ ЦНИИ РТК), Россия, 194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 21, n.tschur@rtc.ru, ORCID: 0000-0003-2480-6861

Реверсионное конструирование оптимальных управлений движением объектов

А.И. Бохонский, Н.И. Варминская✉
Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Черноморское высшее военно-морское орденов Нахимова и Красной Звезды училище имени П.С. Нахимова» Министерства обороны Российской Федерации (ЧВВМУ), Севастополь, Россия, nvarminska@gmail.com

Аннотация
Дано сравнение примеров реверсионно конструируемых оптимальных управлений типа «разгон-торможение» движением объекта с известным классическим управлением (полученным вариационным методом) с использованием различных критериев. Использован алгоритм эквивалентной замены конструируемого оптимального управления другим управлением при условии равенства энергий для достижения цели движения. Показано, что с ростом степени полинома, аппроксимирующего переносное ускорение, не только снижается энергия для практической реализации эквивалентного ему управления типа «разгон-торможение», но и (при заданной частоте свободных колебаний перемещаемого упругого объекта) не исключается уменьшение времени достижения абсолютного покоя.

Ключевые слова
Конструируемое оптимальное управление, полная обратная задача вариационного исчисления, минимальные энергозатраты, эквивалентные преобразования, время достижения абсолютного покоя.

Reversive designing of objects optimal motion controls

Alexander I. Bokhonsky, Natalya I. Varminskaya✉
Federal State Treasury Military Educational Institution of Higher Professional Education «Black Sea Higher Naval Orders of Nakhimov and the Red Star School named after P.S. Nakhimov» of the Ministry of Defense of the Russian Federation, Sevastopol, Russia, nvarminska@gmail.com

Abstract
A comparison of examples of reversibly constructed optimal controls of the «acceleration-deceleration» type for the movement of an object with the known classical control (obtained by the variational method) using various criteria is given. An algorithm for equivalent replacement of a reversionally constructed optimal control with another control is used, provided that the energies are equal to achieve the goal of motion. It is shown that with an increase in the degree of the polynomial approximating the translational acceleration, not only does the energy decrease for the practical implementation of an equivalent control of the «acceleration-deceleration» type, but also (at a given frequency of free oscillations of a moving elastic object) a decrease in the time to reach absolute quiescence is not excluded (as a sum of translational and relative motion).

Key words
Designable optimal control, complete inverse problem of variation calculus, minimal energy consumption, equivalent transformations, time to reach absolute quiescence.

Теории оптимального управления движением объектов, управлению колебаниями упругих систем посвящены работы [1-6] и другие. В настоящее время представляют интерес задачи конструирования оптимальных управлений с использованием алгоритма решения полной обратной задачи вариационного исчисления.

В работах [7-13] на ряде примеров показано, что применение реверсионного принципа оптимальности (РПО), основанного на решении полной обратной задачи вариационного исчисления (без предварительного задания критерия оптимальности – от заданного полинома ускорения до уравнения Эйлера и восстановления функционала-критерия), приводит в ряде случаев при достижении поставленной цели движения к существенной экономии энергетических затрат.

С использованием полиномов для переносных ускорений (управлений), краевых условий и условий косой симметрии управлений типа «разгон-торможение» при заданном времени и расстоянии достигается состояние абсолютного либо относительного покоя. Если перемещается упругий объект, то время движения находится из моментных соотношений в относительном движении как общих корней системы трансцендентных уравнений [9-11]. Для практической реализации нового типа управлений с минимальной энергоемкостью не исключается эквивалентная замена другими управлениями.

При конструировании управления движением деформируемых объектов сложное движение состоит из переносного как абсолютно твердого тела (по отношению к неподвижной системе координат) и относительного – упругих колебаний (в подвижной системе координат).

Цель исследования – сравнение реверсионно конструируемых оптимальных управлений типа «разгон-торможение» движением объекта с известным классическим управлением, которое получено с использованием вариационного исчисления, и их обоснование с привлечением других критериев; совершенствование алгоритма реверсионного конструирования оптимальных управлений движением объектов и поиск эквивалентных по энергоемкости управлений.

Классическое управление типа «разгон-торможение»

В простейшей задаче управления Ж.-Л. Лагранжа при заданном уравнении движения (без учета сопротивления):

$$\frac{d^2S_1}{dt^2} = U_1, \tag{1}$$

краевых условиях

$$S_1(0) = 0, \quad \dot{S}_1(0) = V_1(0) = 0, \quad S_1(T) = L, \quad \dot{S}_1(T) = V_1(T) = 0 \tag{2}$$

и критерии оптимальности $J_1 = \int_0^T U_1^2 dt$ решение задачи вариационным методом теории оптимального управления приводит к известному в литературе результату:

$$U_1(t) = \frac{6L}{T^2}\left(\frac{T-2t}{T}\right), \qquad V_1(t) = \frac{3L}{2T}\left(1-\left(\frac{1-2t}{T}\right)^2\right), \qquad S_1(t) = \frac{L}{4}\left(\left(\frac{T-2t}{T}\right)^3 - \frac{6t}{T} - 1\right), \tag{3}$$

где T – заданное общее время движения из исходного в конечное состояние покоя; L – перемещение; $S_1(t), V_1(t), U_1(t)$ – перемещение, скорость и ускорение переносного движения. Интересно отметить, что выражение (3) можно получить и без использования вариационного метода, т.е. *без заранее задаваемого критерия оптимальности.* В этом случае задаваемый полином, например, для перемещения при определении констант подчиняется краевым условиям, а управление находится как $U_1 = \frac{d^2S_1}{dt^2}$.

При управлении (3) энергия, затрачиваемая на достижение цели движения (конечного состояния покоя при m = 1 кг)

$$A_1 = 2\int_0^{T/2} U_1(t)V_1(t)dt = \frac{2,25L^2}{T^2}.$$

Графики движения согласно зависимостям (3) построены для L = 1м, T = 1с и изображены на рисунке 1.

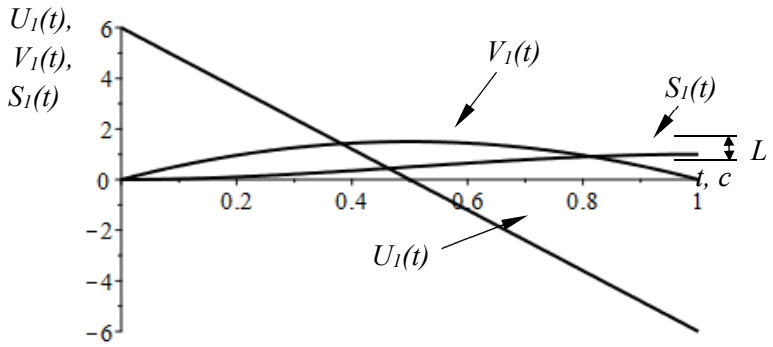


Рисунок 1 — Графики $S_1(t), V_1(t)$ и $U_1(t)$

Существуют универсальные аналитические выражения [13] для управления типа «разгон-торможение», зависящие от степени задаваемого полинома ускорения (n = 1,3,5,7,…):

$$U(t) = \frac{L(2n+4)(T-2t)^n}{T^{n+2}}, \qquad V(t) = \frac{L(n+2)}{T(n+1)}\left(1-(T-2t)^{n+1}\cdot T^{-n-1}\right),$$

$$S(t)=\frac{L}{2T(n+1)}\left(T^{-n-1}(T-2t)^{n+2}+2tn+4t-T\right). \quad (4)$$

В частном случае при $n = 1$ следуют аналитические зависимости (3).

Результаты исследований показывают, что уже при степени полинома $n = 3$ появляется экономия энергии для реализации оптимального управления.

В этом случае

$$U_e(t)=\frac{10L}{T^2}\left(\frac{T-2t}{T}\right)^3, \qquad V_e(t)=\frac{10L}{T}t(T-t)\left(2t^2+2Tt+T^2\right), \quad (5)$$

где, как и ранее, L – перемещение, T – время движения. Энергия, затраченная на перемещение ($m = 1$ кг) из исходного состояния покоя в конечное состояние покоя равна

$$A=2\int_0^{T/2}U_e(t)V_e(t)dt=\frac{1,5625L^2}{T^2}. \quad (6)$$

Согласно [13] принцип наименьшего энергетического принуждения формулируется следующим образом: для оптимального управления типа «разгон-торможение» с ростом степени полинома конструируемого оптимального управления U_n мера энергетического принуждения, принимаемая как интеграл квадрата разности известного и нового управлений

$$E_p=\frac{1}{2}\int_0^T\left(U_1-U_n\right)^2dt,$$

где известное U_1 соответствует критерию $J=\int_0^T U_1^2dt$, стремится к предельному значению.

Ниже представлен сравнительный анализ оптимальных управлений движением, полученных при реверсионном конструировании с различными степенями полинома управления (ускорения), согласно принципу наименьшего энергетического принуждения и другим критериям.

На рисунке 2 изображены для сравнения графики конструируемых управлений $U_5(t)$, $U_9(t)$ и классического $U_1(t)$, где $U_1(t)$, $U_5(t)$, $U_9(t)$ – переносное движение объекта согласно универсальным зависимостям (4).

При $n = 5$, $U_5(t)=\frac{14L}{T^7}(T-2t)^5$; при $n = 9$, $U_9(t)=\frac{22L}{T^{11}}(T-2t)^9$.

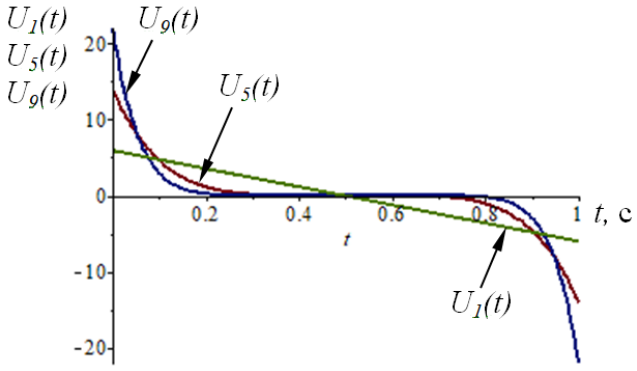


Рисунок 2 — Графики управления $U_1(t)$ и конструируемых управлений $U_5(t)$, $U_9(t)$

Обобщенные характеристики оптимального движения при различных степенях полинома сведены в таблицу 1. Значения параметров, приведенные в таблице 1, свидетельствуют об асимптотическом свойстве кососимметричного управления при возрастании степени полинома. В случае степени $n \to \infty$ действие и энергия ($m = 1$ кг, $L = 1$ м, $T = 1$ с) стремятся к 1 Дж.

С ростом степени полинома затрачиваемая энергия уменьшается, численное значение E_p увеличивается, увеличивается площадь удаляемой части графика переносного ускорения, т.е. избыточная энергия для достижения цели движения.

Итак, сформулирован принцип наименьшего энергетического принуждения, отражающий свойство снижения энергоемкости управляемого движения объекта из исходного в конечное состояние покоя при заданных времени движения и расстоянии.

Если в классической механике принцип наименьшего принуждения позволяет отличать кинематически возможные движения, то при реверсионном конструировании управляемого движения принцип наименьшего энергетического принуждения подтверждает тенденцию к снижению энергии для достижения поставленной цели движения.

Таблица 1 — Обобщенные характеристики движения

Степень полинома n	Норма мощности $J_1=\int_0^T U^2dt$	Действие (по Лагранжу) $J_2=\int_0^T V^2dt$	Энергия $J_3=2\int_0^{T/2} UVdt$	Скорость $V\left(\frac{T}{2}\right)=\int_0^{T/2} Udt$	Критерий принуждения $E_p=\frac{1}{2}\int_0^T\left(U_1-U_n\right)^2dt$	ΔE
1	$\frac{12L^2}{T^3}$	$\frac{1,2L^2}{T}$	$\frac{2,25L^2}{T^2}$	$\frac{1,5L}{T}$		
3	$\frac{14,2857L^2}{T^3}$	$\frac{1,1111L^2}{T}$	$\frac{1,5625L^2}{T^2}$	$\frac{1,25L}{T}$	$\frac{1,1428L^2}{T^3}$	$\frac{0,6875mL^2}{T^2}$
5	$\frac{17,818L^2}{T^3}$	$\frac{1,0769L^2}{T}$	$\frac{1,3611L^2}{T^2}$	$\frac{1,166L}{T}$	$\frac{2,909L^2}{T^3}$	$\frac{0,8889mL^2}{T^2}$
15	$\frac{37,2903L^2}{T^3}$	$\frac{1,0303L^2}{T}$	$\frac{1,1289L^2}{T^2}$	$\frac{1,0625L}{T}$	$\frac{25,2903L^2}{T^3}$	$\frac{1,1211mL^2}{T^2}$
117	$\frac{241,038L^2}{T^3}$	$\frac{1,0042L^2}{T}$	$\frac{1,017L^2}{T^2}$	$\frac{1,0085L}{T}$	$\frac{114,52L^2}{T^3}$	$\frac{1,233mL^2}{T^2}$

$$\Delta E=2m\left(\int_0^{T/2}U_1V_1\,dt-\lim_{n\to\infty}\int_0^{T/2}U_nV_n\,dt\right)=\frac{mL^2}{T^2}(2,25-1)=1,25\frac{mL^2}{T^2},$$

где m – масса (кг), L – перемещение (м), T – время (с), L и T заданы, U_1 – ускорение и V_1 – скорость при степени задаваемого полинома $n = 1$, U_n, V_n – при нечетной степени полинома ($n = 3,5,7...$) .

Для практической реализации возможна замена управления (5) эквивалентным по энергоемкости управлением с использованием полиномов достаточно высокой степени.

Процедура эквивалентной замены оптимального управления.

Перемещение объекта как абсолютно твердого тела описывается полиномом:

$$S_2\left(t\right)=\sum_{i=1}^{11}C_i\cdot t^{i+1}. \qquad (7)$$

Произвольные постоянные $C_1,\dots C_{11}$ в (7) найдены с использованием: краевых условий, косой симметрии проектируемого управления, равенства энергий – известного управления (5) и проектируемого эквивалентного. Полином (7) заведомо отражает движение из состояния покоя $S_2\left(0\right)=0,\quad \dot{S}_2(0)=V_2\left(0\right)=0,$ $U_2\left(0\right)=0;$ условия на правом конце $S_2\left(T\right)=L,\ V_2\left(T\right)=0,\ \left.\frac{d^2U_2(t)}{dt^2}\right|_{t=T}=0,$ дополнительно необходимо $\left.\frac{dU_2(t)}{dt}\right|_{t=T}=\left.\frac{dU_2(t)}{dt}\right|_{t=0}$. Непосредственно учитывается косая симметрия управляемого движения

$$S_2\left(T/2\right)=L/2,\ U_2\left(T/2\right)=0,\ \dot{U}_2\left(T/2\right)=0,\quad \ddot{U}_2\left(T/2\right)=0.$$

Эквивалентность по энергии предполагает равенство $2\int_0^{T/2}U_2(t)V_2(t)dt=\frac{1,5625L^2}{T^2}.$

Графики $S_2\left(t\right),V_2\left(t\right)$ и $U_2\left(t\right)$ изображены на рисунке 3.

Графики (рис. 3) подтверждают достижение цели движения – нового состояния покоя; при этом характер управления (ускорения) меняется, что может упростить его практическую реализацию.

За счет увеличения степени задаваемого полинома оптимального перемещения возможно дальнейшее уточнение характера поведения объекта при эквивалентном управлении (рис.4). На рисунке 5 показано, что по сравнению с известным классическим управлением уточненное управление по внешнему виду отличается от классического (рис. 1, 5), но цель движения достигается при экономии энергии (до 25 %).

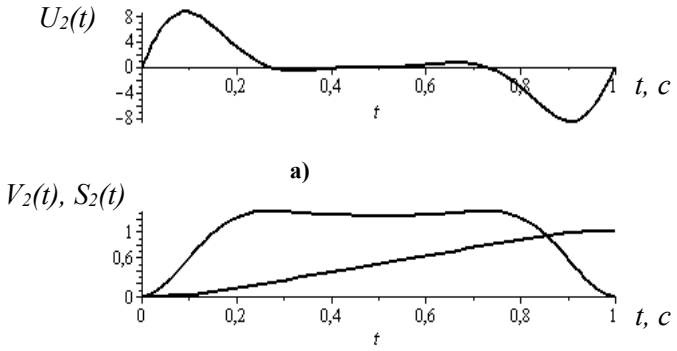


Рисунок 3 — Графики для *n* = 3: а) эквивалентного управления $U_2(t)$; б) скорости $V_2(t)$ и перемещения $S_2(t)$

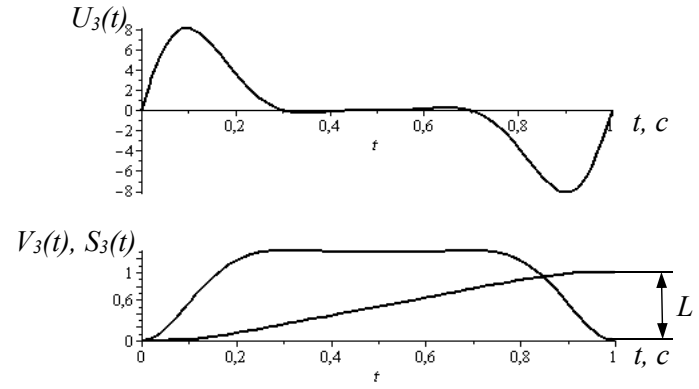


Рисунок 4 — Графики уточненного управления: $S_3(t), V_3(t), U_3(t)$

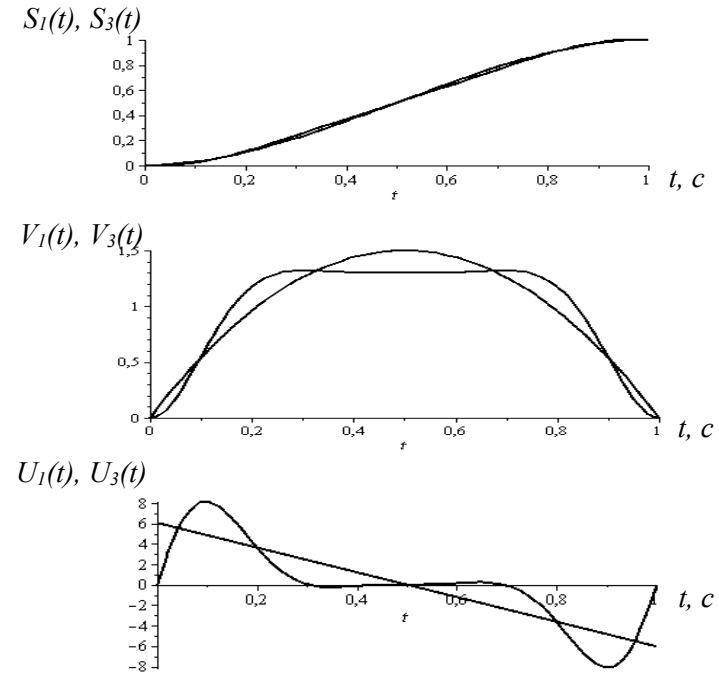


Рисунок 5 — Графики сравнения управляемых движений: а) перемещений; б) скоростей; в) ускорений

Форма функции управления может отличаться путем увеличения степени полинома и использования дополнительных условий косой симметрии. Следует отметить, что с ростом степени полинома ускорения, как

было отмечено в работах [8-13], энергия асимптотически уменьшается (m = 1 кг): при n = 5 энергия $A_5 = 1,3611 L^2/T^2$, а при $n = 7$ $A_7 = 1,2656 L^2/T^2$.

Определение времени достижения абсолютного покоя упругой системы.

Дифференциальное уравнение колебаний упругого осциллятора (в относительном движении, без учета сопротивления) при оптимальном переносном движении записывается в виде:

$$\ddot{x}_r + k^2 x_r = -U_e(t), \tag{8}$$

где k – частота собственных колебаний, $U_e(t) = \frac{10L}{T^2}\left(\frac{T-2t}{T}\right)^3$ – полином ускорения, n = 3.

С учетом введенных обозначений ($T_1 = 2\pi / k$ – период собственных колебаний, $f = T / T_1$, где T – общее время движения) при движении из состояния покоя ($x_r(0) = 0,\ \dot{x}_r(0) = 0$) моментные соотношения ($x_r(T) = 0,\ \dot{x}_r(T) = 0$), после ряда преобразований, переписываются следующим образом:

$$\begin{aligned} x_r(f) &= -\cos(2\pi f)\pi^3 f^3 - \pi^3 f^3 + 3\sin(2\pi f)\pi^2 f^2 + 6\cos(2\pi f)\pi f + 6\pi f - 6\sin(2\pi f) = 0, \\ \dot{x}_r(f) &= \sin(2\pi f)\pi^3 f^3 + 3\cos(2\pi f)\pi^2 f^2 - 3\pi^2 f^2 - 6\sin(2\pi f)\pi f + 6 - 6\cos(2\pi f) = 0. \end{aligned} \tag{9}$$

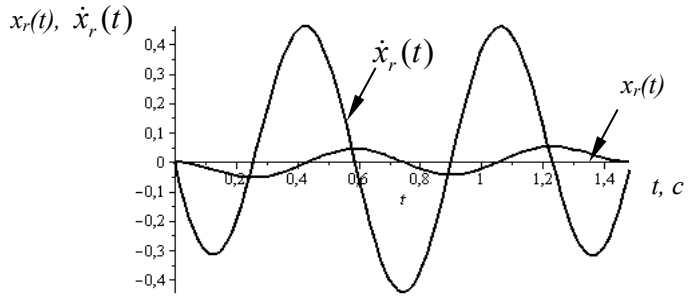


Рисунок 6 — Графики относительного движения

Два первых общих корня системы (9) с достаточной для практики точностью найдены графически: f_1 = 1,22; f_2 = 2,28. При k = 10 с$^{-1}$ этим корням соответствуют значения времени движения: $T_1 = \frac{2\pi f_1}{k} = 0,766$ с; $T_2 = \frac{2\pi f_2}{k} = 1,495$ с.

Графики колебаний осциллятора в интервале $T \geq t \geq 0$ изображены на рисунке 6. В момент времени $t = T_2$ достигается покой.

Параметр f, отражающий связь требуемого общего времени движения и периода собственных колебаний ($T = fT_1$), зависит в свою очередь от степени n полинома ускорения (таблица 2).

Таблица 2 — Зависимость времени движения от степени полинома ускорения

n	1	3	5	7	11
f_1	1,41	1,21	1,16	1,11	1,06
f_2	2,45	2,38	2,28	2,20	2,15

На рисунке 7 изображены графики $f_1(n)$ и $f_2(n)$, свидетельствующие об уменьшении общего времени движения с ростом степени полинома (функции $f = ae^{-bn}$).

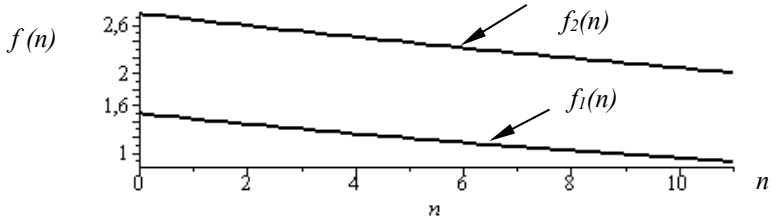


Рисунок 7 — Графики зависимостей $f_1(n)$ и $f_2(n)$

Заключение

Следует отметить, что принцип наименьшего энергетического принуждения перекликается с принципом наименьшего действия (например, в форме Ж. Л. Лагранжа), отражая в данном случае тенденцию снижения энергозатрат. Конечный предельный результат ($n \to \infty$) свидетельствует о том, что предельная экономия энергии стремится к постоянной скорости на участке движения, но, естественно, возникают трудности практической реализации при задании такой скорости (разгоне) и ее устранении (торможении).

Если принцип наименьшего принуждения (К.Ф. Гаусс) позволяет отличить действительное движение от возможных, то принцип наименьшего энергетического принуждения иллюстрирует энергетическое отличие конструируемого оптимального управления от классического.

Предложен алгоритм эквивалентных по энергоемкости преобразований ускорений, позволяющий находить удобные для практической реализации управления движением объектов. Численные эксперименты подтверждают снижение минимального времени достижения состояния покоя упругой системы (например, как одного из общих корней системы трансцендентных уравнений – моментных соотношений в относительном движении) с ростом степени полинома оптимального переносного ускорения с параллельным уменьшением действия

(в форме Лагранжа $J = \int_0^T \dot{x}_r^2 dt$).

Литература

1. Красовский Н.Н. Теория управления движением. М.: Наука, 1968. 476 с.
2. Крутько П.Д. Обратные задачи динамики управляемых систем: линейные модели. М.: Наука, 1987. 304 с.
3. Карновский И.А. Методы оптимального управления колебаниями деформируемых систем. К.: Высш. школа, 1982. 116 с.
4. Троицкий В.А. Оптимальные процессы колебаний механических систем. – Л.: Машиностроение, 1976. 236 с.
5. Черноусько Ф.Л. Управление колебаниями. М.: Наука, 1980. 384 с.
6. Бутковский А.Г. Методы управления системами с распределенными параметрами. М.: Наука, 1975. 568 с.
7. Бохонский А.И. Энергоемкость управления перемещением объектов // Фундаментальные основы механики / Материалы международной научно-практической конференции. Новокузнецк: НИЦ МС, 2017. С. 38 – 41.
8. Бохонский А.И., Рыжков А.И. Конструирование управляемого движения объекта // Механика, автоматика и робототехника / Материалы международной научно-практической конференции. Новокузнецк: НИЦ МС, 2017. С. 64–69.
9. Бохонский А.И., Варминская Н.И., Рыжков А.И. Конструирование оптимального управления движения объектов как абсолютно твердых и деформируемых тел // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии / Научно-технический журнал. Орел: НИЦ МС, 2016. С. 70 – 76.
10. Бохонский А.И., Майстришин М.М. Оптимальность конструируемых управлений перемещением объектов // Научно-технический журнал. Гос. университет–УНПК, 2017. – С. 31 – 38.
11. Бохонский А.И. Реверсионный принцип оптимальности. М.: Вузовский учебник: ИНФРА-М, 2016. 174 с.
12. Bokhonsky A., Varminskaya N. Evaluation of energy consumption for the object motion optimal control // IC-MTMTE IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2020. (https://doi.org/10.1088/ 1757-899X/709/4/044093).
13. Бохонский А.И., Варминская Н.И., Рыжков А.И. Снижение энергетического принуждения при эквивалентном оптимальном управлении движением объекта // Журнал передовых исследований в области естествознания. С-Пб.: НИЦ МС, 2022. С. 24 – 30.

Информация об авторах

Бохонский Александр Иванович, профессор, д.т.н., профессор кафедры физики и общетехнических дисциплин, Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Черноморское высшее военно-морское орденов Нахимова и Красной Звезды училище имени П.С. Нахимова» Министерства обороны Российской Федерации (ЧВВМУ), Россия, 299028, Севастополь, ул. Дыбенко, д. 1а, bohon.alex@mail.ru

Варминская Наталья Ивановна, доцент, к.т.н., заведующий кафедрой физики и общетехнических дисциплин, ЧВВМУ, Россия, 299028, Севастополь, ул. Дыбенко, д. 1а, nvarminska@gmail.com

Траекторное планирование движения при резервировании контуров управления пятизвенным манипулятором параллельной структуры

К.В. Гриценко
Санкт-Петербургский Государственный Морской Технический Университет (СПБГМТУ), Санкт-Петербург, Россия, kristya1808@mail.ru

Аннотация
В статье рассматривается траекторное планирование движения для пятизвенного манипулятора параллельной структуры с резервированием контуров управления. Параллельные манипуляторы, обладающие высокой жесткостью и точностью, находят применение в задачах, требующих точного позиционирования и быстрого выполнения операций. Основное внимание уделяется проблемам траекторного планирования, включая требования к плавности, минимизации времени и обеспечению устойчивости системы. Ключевым элементом исследования является использование резервирования контуров управления, которое повышает надежность системы, активируя резервные контуры при сбоях или при прохождении через сингулярные состояния — конфигурации, при которых система теряет управляемость. В статье рассматриваются и алгоритмы преодоления зон сингулярностей, такие как автоматизированное построение локусов сингулярностей, использование псевдообратной матрицы Якоби и методы оптимизации траектории. Результаты исследования находят применение в таких областях, как прецизионная сборка микросхем, медицинская робототехника и системы виртуальной реальности, с перспективами дальнейшей оптимизации посредством искусственного интеллекта и адаптивных методов управления в реальном времени.

Ключевые слова
Траекторное планирование, манипуляторы параллельной структуры, методы оптимизации, автоматический расчет, сингулярные конфигурации, технологические процессы, резервирование контуров.

Благодарности
Исследования выполнены при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках реализации программы «Приоритет 2030».

Trajectory motion planning with redundant control loops for a five-link manipulator of parallel structure

Kristina V. Gritsenko
Saint-Petersburg State Marime Technical University (SMTU), St. Petersburg, Russia, kristya1808@mail.ru

Abstract
This article discusses trajectory planning for a five-link parallel manipulator with control loop redundancy. Parallel manipulators, known for their high rigidity and precision, are widely used in tasks requiring accurate positioning and fast operation. The study focuses on the challenges of trajectory planning, emphasizing the need for smoothness, time efficiency, and system stability. A key aspect of the research is the implementation of control loop redundancy, which enhances system reliability by activating backup control loops in case of failure or when navigating through singularities—configurations where control becomes unstable. Several methods for singularity avoidance are explored, including singularity mapping, pseudoinverse Jacobian matrices, and trajectory optimization algorithms. The findings highlight the practical applications of these techniques in areas such as precision electronics assembly, medical robotics, and virtual reality systems, with further potential for optimization through artificial intelligence and real-time adjustments.

Key words
Trajectory planning, parallel manipulators, optimization methods, automatic calculation, singular configurations, technological processes, control loop redundancy.

Acknowledgements
Ministry of Education and Science of Russia within the framework of the strategic academic leadership program «Priority-2030».

Введение

Современные робототехнические системы активно применяются в различных областях, начиная от производства и заканчивая медициной и исследовательскими задачами. Одним из наиболее перспективных направлений развития робототехники является использование параллельных манипуляторов. Эти устройства обладают высокой жесткостью и точностью, что делает их незаменимыми в задачах, требующих точного позиционирования и быстрого выполнения операций. Параллельные манипуляторы состоят из нескольких звеньев, которые работают синхронно для достижения заданного положения исполнительного органа. Одной из ключевых задач управления параллельными манипуляторами является траекторное планирование движения.

В данной статье рассмотрим особенности траекторного планирования движения для пятизвенного манипулятора параллельной структуры с использованием резервирования контуров управления. Резервирование контуров управления позволяет повысить надежность системы и улучшить ее динамические характеристики.

Параллельные манипуляторы, в отличие от последовательных, обладают симметричной структурой, где несколько приводов работают параллельно для управления положением одной платформы. Пятизвенные манипуляторы параллельной структуры относятся к категории систем с несколькими степенями свободы. Такая структура имеет следующие преимущества:

Высокая жесткость за счет равномерного распределения нагрузок;

– высокая точность позиционирования;
– способность выдерживать большие внешние усилия;
– компактные размеры по сравнению с последовательными манипуляторами с аналогичным функционалом.

Конкретно пятизвенный манипулятор состоит из подвижной платформы, соединенной с основанием через пять независимых звеньев, каждая из которых приводится в движение своим приводом. Задача управления заключается в том, чтобы корректно координировать движение всех приводов, чтобы платформа перемещалась по заданной траектории.

Задача траекторного планирования

Траекторное планирование движения манипулятора — это процесс расчета необходимого пути, по которому должна двигаться платформа манипулятора, для достижения заданной конечной позиции и ориентации. Основными требованиями к траектории являются:

– гладкость траектории, т.е. отсутствие резких изменений скорости и ускорения;
– минимизация времени выполнения задачи;
– учет физических ограничений приводов, таких как максимальная скорость, ускорение и усилие;
– обеспечение устойчивости движения, чтобы избежать вибраций или неустойчивых состояний.

Для пятизвенного манипулятора параллельной структуры задача усложняется необходимостью синхронного управления всеми приводами и учета кинематических ограничений, накладываемых геометрией устройства. В отличие от последовательных манипуляторов, где каждое звено управляется независимо, в параллельной структуре положение каждого звена влияет на общую кинематику всей системы.

Резервирование контуров управления

Резервирование контуров управления заключается в том, что система управления имеет дополнительные контуры, которые активируются в случае отказа основного контура или для улучшения характеристик работы системы. Это особенно актуально для сложных систем, таких как пятизвенные манипуляторы, где даже небольшой сбой в работе одного привода может привести к потере точности или стабильности движения. Резервирование контуров управления в робототехнических системах — это метод обеспечения дополнительной надежности и отказоустойчивости системы. Для пятизвенных параллельных манипуляторов резервирование позволяет компенсировать возможные ошибки управления или отказ отдельных приводов, особенно в сложных ситуациях, таких как прохождение через зоны сингулярностей.

Основные задачи, решаемые резервированием контуров управления:

– обеспечение непрерывности движения манипулятора в случае отказа одного или нескольких приводов;
– повышение точности траекторного планирования за счет перераспределения нагрузки между приводами;
– оптимизация энергопотребления за счет использования резервных контуров для поддержки работы основных приводов.
– предсказание и предотвращение сингулярных состояний: резервные контуры могут отслеживать изменения в динамике системы и заранее корректировать траекторию, чтобы избежать попадания в сингулярности.

При резервировании используются дополнительные каналы измерения и коррекции, которые могут компенсировать ошибки позиционирования или отклонения траектории в реальном времени. Применение резервирования особенно важно для параллельных манипуляторов, где отказ одного привода может значительно исказить работу всей системы.

Сингулярные конфигурации при планировании траектории манипулятора

Параллельные манипуляторы состоят из нескольких независимых приводов, работающих совместно для управления подвижной платформой. В случае пятизвенного манипулятора существует множество степеней свободы, что позволяет достигать высокой точности и гибкости при выполнении задач. Однако наличие нескольких приводов, работающих параллельно, также приводит к возникновению сингулярных состояний, когда управление становится затруднительным или невозможным.

Сингулярности возникают, когда матрица Якоби манипулятора становится вырожденной, что приводит к потере управляемости. В таких зонах движение манипулятора становится неустойчивым, а малейшие изменения управляющих сигналов могут приводить к большим смещениям или, наоборот, система может терять способность к движению. Преодоление областей сингулярности требует особого подхода к планированию траектории и активного использования резервирования контуров управления.

Методы и алгоритмы траекторного планирования с учетом сингулярностей

Планирование траектории пятизвенного манипулятора с учетом зон сингулярностей и резервирования контуров управления требует применения специальных методов, которые учитывают как кинематические, так и динамические ограничения системы. Рассмотрим ключевые методы и алгоритмы.

1. Алгоритм автоматизированного расчета зон сингулярностей

Этот метод заключается в том, чтобы заранее определять зоны сингулярностей и планировать траектории таким образом, чтобы избегать попадания в эти опасные области. Для этого строится карта сингулярных состояний манипулятора на основе анализа его кинематической модели. Использование резервирования контуров позволяет не только корректировать отклонения, но и предсказать приближение сингулярной зоны и внести изменения в траекторию движения, чтобы обойти сингулярные точки.

2. Метод определения псевдообратной матрицы Якоби

Этот метод применяется для управления манипулятором вблизи сингулярных состояний. В нормальных условиях для расчета требуемых скоростей звеньев используется обратная матрица Якоби, но в сингулярных состояниях эта матрица вырождается. В таких случаях вместо нее используется псевдообратная матрица Якоби, которая позволяет продолжить управление даже в сингулярных зонах. Резервирование контуров управления в этом методе позволяет поддерживать стабильность системы при приближении к сингулярностям и компенсировать неточности, вызванные вырождением матрицы.

3. Метод управляемого прохождения через сингулярности

Иногда избежать зон сингулярностей невозможно, поэтому разрабатываются методы безопасного прохождения через такие области. Основной подход заключается в том, чтобы замедлить движение манипулятора при приближении к сингулярности, снизить ускорения и активировать резервные контуры для компенсации возможных отклонений в траектории. В этом случае резервные контуры управления берут на себя основную задачу поддержания устойчивости системы.

4. Оптимизация траектории с учетом сингулярностей

Этот метод заключается в построении оптимальной траектории, которая минимизирует попадание в зоны сингулярностей и обеспечивает гладкое движение манипулятора. При этом алгоритмы оптимизации учитывают динамические ограничения, такие как максимальные скорости и ускорения звеньев, а также возможность использования резервирования. Например, можно использовать методы оптимизации на основе градиентного спуска или генетических алгоритмов для поиска траектории, которая обеспечивает максимальную эффективность при минимизации рисков, связанных с сингулярностями.

5. Алгоритм преодоления сингулярностей с помощью резервирования контуров

Резервирование контуров управления играет ключевую роль при прохождении манипулятором через сингулярные зоны. За счет дополнительных сенсоров и управляющих каналов система может компенсировать неустойчивые движения и ошибки. Для эффективного планирования траекторий в условиях сингулярностей применяются следующие подходы:

1. Избегание сингулярных конфигураций: при планировании траектории: следует избегать точек, в которых возможна сингулярность. Для этого можно использовать методы, анализирующие конфигурацию манипулятора и предсказывающие возможные сингулярности (аппроксимация рабочего пространства, нормализация детерминанта Якобиана).
2. Мягкое переключение между конфигурациями: при нахождении точки близкой к сингулярности. Планирование траектории происходит таким образом, что манипулятор проходит через эту точку с минимальными возмущениями и огибает ее.
3. Оптимизация траектории: применение алгоритмов оптимизации траектории в условиях сингулярностей может помочь уменьшить степень сингулярности и повысить эффективность движения манипулятора. Эти методы направлены на поиск оптимальной траектории движения манипулятора, учитывающей его кинематические и динамические характеристики. Примеры таких методов включают в себя генетические алгоритмы, алгоритмы имитации отжига, методы оптимизации на основе градиента и другие.

4. Использование нескольких решений: разработка нескольких альтернативных траекторий и переключение между ними в зависимости от сингулярности может обеспечить более стабильное и эффективное движение манипулятора.

5. Применение динамического моделирования: использование динамической модели манипулятора позволяет учесть влияние инерционных сил и моментов на движение системы, что может помочь предотвратить сингулярности (см. рис. 1) [2].

Применение указанных подходов в сочетании с современными методами планирования движения может значительно улучшить качество и эффективность работы пятизвенного манипулятора параллельной структуры в условиях сингулярностей.

При моделировании планирования траектории движения манипулятора задана математическая модель и параметры пятизвенного манипулятора. Производим генерацию лога сингулярностей в массиве. Далее рассчитываем абсолютное значение шага, измеренное от нуля. его необходимо преобразовать в относительный шаг от точки к точке. Проверяем, находятся ли сингулярности вблизи каких-либо точек на пути xy. Для каждой точки на пути необходимо проверить каждую сингулярность. Далее осуществляется контроль искажений по абсолютным углам. Соответственно используются алгоритмы оптимизации и динамического моделирования, что дает результат по спину и другим параметрам моделирования (см. рис. 1) [3].

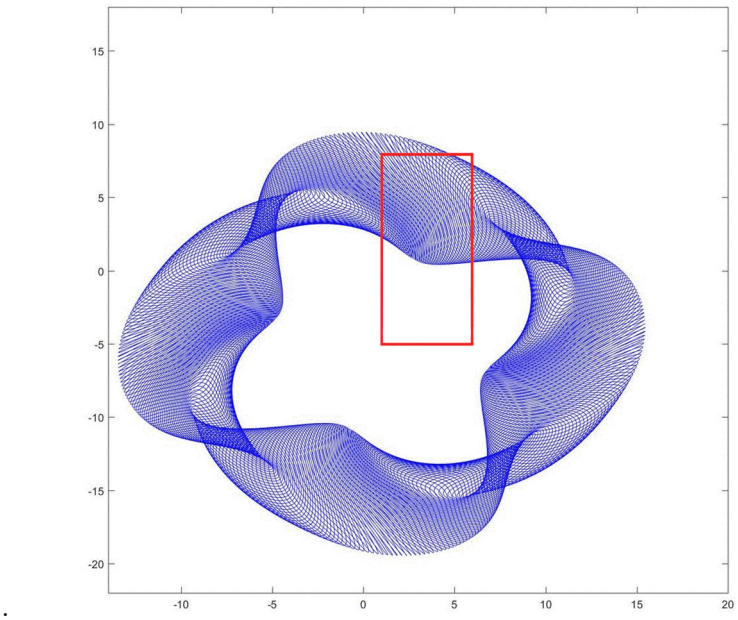


Рисунок 1 — Траекторное планирование движение пятизвенного манипулятора

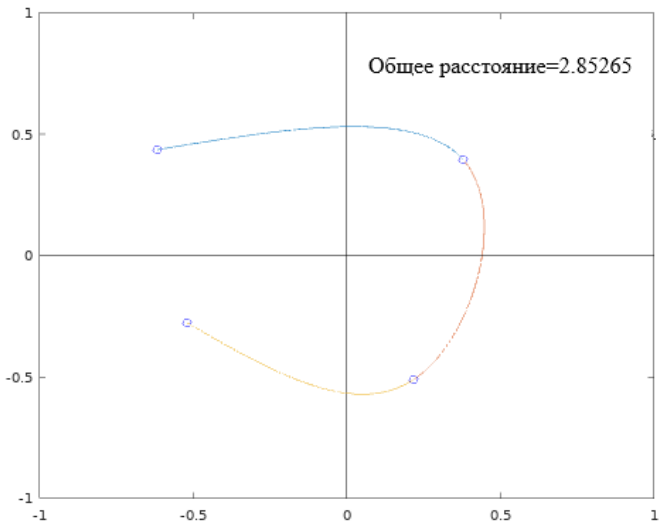


Рисунок 2 — Расчет траектории пятизвенного манипулятора

Траекторное планирование движения манипуляторов параллельной структуры является важной задачей в робототехнике, поскольку такие системы обладают высокой жесткостью, точностью и скоростью работы. Однако, одним из ключевых вызовов в проектировании и управлении этими манипуляторами являются

сингулярности — состояния, при которых система теряет управляемость или устойчивость. Для эффективного траекторного планирования необходимо разрабатывать методы, которые позволяют либо избегать сингулярных конфигураций, либо минимизировать их влияние на работу системы. Одним из подходов является использование обратной кинематики для предсказания возникновения сингулярных состояний и корректировки траектории движения при выполнении расчета общей траектории (см. рис. 2) [4].

Обобщенный вид планирования траектории при обходе сингулярностей требует следующих этапов. Необходимо решить задачи прямой и обратной кинематики в обобщенном виде:

$$p = f(q) \text{ и } q = f^{-1}(p), \quad (1)$$

где p - положение и ориентация подвижной платформы манипулятора; q угловые координаты звеньев манипулятора

Найти матрицу Якоби(J):Определение сингулярностей требует вычисления матрицы Якоби, которая описывает связь между скоростями звеньев и скоростями платформы [5]:

$$\dot{p} = J(q)\dot{q}$$

Сингулярность возникает, когда матрица Якоби становится вырожденной: $\det(J) = 0$.

Алгоритм огибания зон сингулярностей: для того чтобы избежать сингулярных состояний, задача траекторного планирования включает в себя модификацию траектории таким образом, чтобы не приближаться к зонам сингулярностей. Это можно выразить через минимизацию функционала [6]:

$$C(q) = \frac{1}{\det\left(J(q)J^T(q)\right)}. \quad (2)$$

Этот функционал стремится к бесконечности при приближении к сингулярным положениям, что помогает избегать таких точек при планировании траектории.

Угловые скорости звеньев: для планирования движения угловые скорости звеньев можно скорректировать на основе псевдообратной матрицы Якоби J^+ для минимизации попадания в сингулярные зоны [7]:

$$\dot{q} = J^+(q)\dot{p} + \left(I - J^+J\right)z, , \quad (3)$$

где J^+ - псевдообратная матрица Якоби; I - единичная матрица; z - произвольный вектор, который выбирается для того, чтобы минимизировать ошибки вблизи сингулярных состояний.

Оптимизация траектории: Финальная траектория для платформы определяется решением задачи оптимизации, которая учитывает минимизацию приближения к сингулярностям [8]:

$$\min_{q(t)} \int_0^T \left(\left\| \dot{p}(t) \right\|^2 + \alpha C\left(q(t)\right) \right) dt, \quad (4)$$

где $\left\| \dot{p}(t) \right\|^2$ - скорость перемещения платформы; $C\left(q(t)\right)$ - функция избегания сингулярных состояний; α - весовой коэффициент, контролирующий степень избегания зон сингулярностей.

Эта формула описывает общий подход к планированию траектории с учетом огибания зон сингулярностей, синей линий обозначена траектория, область сингулярности отмечена красным цветом (см. рис. 3) [9].

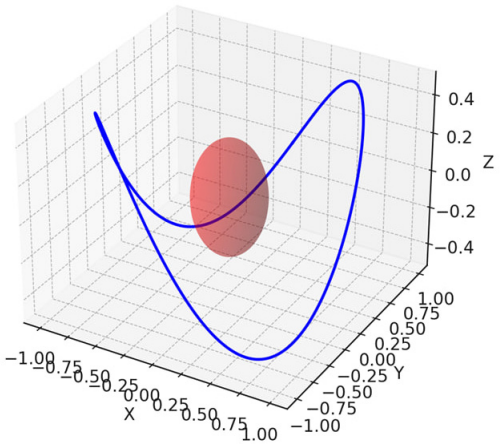


Рисунок 3 — Траекторное планирование движения пятизвенного манипулятора с учетом обхода зоны сингулярности

Заключение

Использование траекторного планирования с резервированием контуров управления для пятизвенных параллельных манипуляторов находит применение в таких областях, как:

- прецизионная сборка микросхем и электроники;
- медицинская робототехника, где требуется высокая надежность и точность движений;
- системы виртуальной реальности и симуляции;
- производственные линии, где манипуляторы используются для высокоточных операций.

Подводя итоги, рассмотрены результаты моделирования при траекторном планировании движения пятизвенного манипуляторам с расчетом траектории и ее визуализацией, а также при изменяющихся параметрах движения (например, при определении спина и конфигурационного пространства манипулятора).

Перспективы развития технологий траекторного планирования включают улучшение методов оптимизации движения, развитие интеллектуальных систем прогнозирования отказов, а также использование искусственного интеллекта для адаптации траектории в реальном времени [10].

Литература

1. A. I. Ivanov and K. V. Gritsenko, "Kinematic Analysis of a Five-link Parallel Manipulator," 2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus), Saint Petersburg, Russian Federation, pp. 666-669, 2022.

2. K. Gritsenko, "Problems of Trajectory Planning in Manipulators with Parallel Kinematics," 2023 Seminar on Information Computing and Processing (ICP), Saint Petersburg, Russian Federation, pp. 76-79, 2023.

3. D. Zlatanov, R.G. Fenton, B.Benhabib., Singularity analysis of mechanisms and robots via a velocity-equation model of the instantaneous kinematics. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 986–991, 1994.

4. Nonsingular Integral-Type Dynamic Finite-Time Synchronization for Hyper-Chaotic Systems / K. A. Alattas, J. Mostafaee, S. Mobayen [et al.] // Mathematics. – 2022. – Vol. 10, No. 1. – DOI 10.3390/math10010115. – EDN ZDBGGV.

5. Karpov, A. D. Designing the platform for monitoring and visualization orientation in Euler angles / A. D. Karpov, A. A. Zhilenkov // Proceedings of the 2017 IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference, ElConRus 2017, St. Petersburg, 01–03 февраля 2017 года. – St. Petersburg, 2017. – P. 301-305. – DOI 10.1109/EIConRus.2017.7910551. – EDN XMZGNY.

6. Weyrer, M.; Brandstötter, M.; Husty, M. Singularity Avoidance Control of a Non-Holonomic Mobile Manipulator for Intuitive Hand Guidance. Robotics. – 2019. Vol. 8. – DOI 10.3390/robotics8010014.

7. Bohigas, O., Manubens, M., Ros, L Singularity-Free Path Planning. In: Singularities of Robot Mechanisms. Mechanisms and Machine Science, Springer, Cham Vol 41, 2017. – DOI 10.1007/978-3-319-32922-2_5

8. Liu, Sheng & Qiu, Zhi-cheng & Zhang, Xianmin. Singularity and path-planning with the working mode conversion of a 3-DOF 3-RRR planar parallel manipulator. Mechanism and Machine Theory, 2017, DOI: 107. 10.1016/j.mechmachtheory.2016.09.004.

9. Gasparetto, A., Boscariol, P., Lanzutti, A., Vidoni, R. Path Planning and Trajectory Planning Algorithms: A General Overview. In: Carbone, G., Gomez-Bravo, F. (eds) Motion and Operation Planning of Robotic Systems. Mechanisms and Machine Science, Springer, Cham, vol 29, 2015, DOI: 0.1007/978-3-319-14705-5_1.

10. Антонов Владимир Олегович, Гурчинский Михаил Михайлович, Петренко Вячеслав Иванович, Тебуева Фариза Биляловна Метод планирования оптимальной траектории движения трехзвенного манипулятора в объемном пространстве с препятствием // Вестник ДГТУ. Технические науки. 2018. №1. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/metod-planirovaniya-optimalnoy-traektorii-dvizheniya-trehzvennogo-manipulyatora-v-obemnom-prostranstve-s-prepyatstviem (дата обращения: 26.09.2024).

Информация об авторе

Гриценко Кристина Вадимовна, старший преподаватель кафедры киберфизических систем, Санкт-Петербургский Государственный Морской Технический Университет (СПБГМТУ), Россия, 190121, Санкт-Петербург, Лоцманская ул., д. 3, kristya1808@mail.ru, ORCID: 0009-0002-1264-5095

Алгоритм распределения задач в последовательной производственной цепочке на основе диффузионного алгоритма

Д.Н. Воронцов
Санкт-Петербургский Государственный Морской Технический Университет (СПБГМТУ), Санкт-Петербург, Россия, dn.voronzov@mail.ru

Аннотация
В данной статье автор рассматривает возможность оптимизации распределения задач между манипуляторами, составляющими последовательную производственную цепочку. Основой решения данной задачи является диффузионный алгоритм, используемый в распределенных вычислительных системах. Необходимость его трансформации обусловлена тем, что в последовательной производственной цепочке невозможно выполнять параллельную обработку заготовки, а сами операции должны выполняться в строгой последовательности. В результате сформулировано описание алгоритма оптимизации, учитывающего последовательность выполнения операций и эффективность каждого манипулятора в отдельности, приведены примеры оптимизации тестовых последовательностей в сравнении с эталонным, практически недостижимым значением. Разработана структура абстрактной модели манипулятора в виде функционального пользовательского блока в среде Matlab/simulink, позволяющая гибко изменять количество задействованных в процессе манипуляторов и их загрузку. Для верифицирования результатов моделирование оптимизированных и неоптимизированных систем с наблюдением за выходом конечного продукта и сравнением простоев из-за неравномерной загрузки. В заключение следует отметить, что алгоритм может быть расширен для динамического реагирования на изменения в структуре системы за счет добавления или выхода из строя оборудования.

Ключевые слова
Диффузионный алгоритм, оптимизация, распределение задач, моделирование производства.

Благодарности
Исследования выполнены при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках реализации программы Научного центра мирового уровня по направлению «Передовые цифровые технологии» СПбГМТУ (соглашение от 20.04.2022 № 075-15-2022-312).

An algorithm for distributing tasks in a sequential production chain based on a diffusion algorithm

Dmitriy N. Voronzov
Saint-Petersburg State Marime Technical University (SMTU), St. Petersburg, Russia, dn.voronzov@mail.ru

Abstract
In this article, the author considers the optimizing possibility of tasks distribution between manipulators that make up a sequential production chain. The basis for solving this problem is a diffusion algorithm used in distributed computing systems. The need for its transformation is due to the fact that in a sequential production chain it is impossible to perform parallel processing of the workpiece, and the operations themselves must be carried out in strict sequence. As a result, a description of the optimization algorithm is formulated, taking into account the sequence of operations and the efficiency of each manipulator separately, examples of optimization of test sequences in comparison with a reference, virtually unattainable value are given. The structure of the abstract manipulator model in the form of a functional user block in the Matlab/simulink environment has been developed, which allows flexibly changing the number of manipulators involved in the process and their loading. Further, the simulation of optimized and non-optimized systems was carried out with the observation of the output of the final product and the comparison of downtime due to uneven load. In conclusion, it is noted that the algorithm can be expanded to dynamically respond to changes in the system structure due to the addition or failure of equipment.

Key words
Diffusion algorithm, optimization, tasks distribution, production modeling.

Acknowledgements
The research was carried out with the financial support of the Ministry of Education and Science of Russia as part of the implementation of the program of the World-Class Scientific Center in the direction of "Advanced Digital Technologies" of SPbGMTU (agreement dated 04.20.2022 No. 075-15-2022-312).

Введение

Широкое внедрение роботизированных систем в конвейерное производство позволило повысить производительность и качество продукции, а также безопасность рабочего процесса. Роботизированные манипуляторы постепенно совершенствуются, повышая точность, скорость и мобильность и, как следствие, им доверяют выполнение все более сложных технологических операций. Эти преимущества привели к уменьшению доли рабочих в конвейерной линии и все большему увеличению протяжённости роботизированных участков вплоть до охвата полного цикла работ на конкретной линии.

В связи с увеличением продолжительности работы роботизированной линии возникает вопрос, связанный с распределением рабочих задач. Особенно остро он встает, когда рабочий ряд манипуляторов представлен объектами со схожим функционалом, которые могут заменять функции друг друга.

Если есть возможность собирать информацию о текущем состоянии работ и параметрах системы управления, появляется возможность оптимизировать распределение задач по фактическому состоянию загруженности производственной линии с учетом возможностей каждого отдельного манипулятора.

Актуальность

Современные конвейерные линии используют роботов-манипуляторов, что снижает значимость человеческого фактора, но в то же время усугубляет проблемы с недостаточной гибкостью и возможностью динамической перестройки производственной системы в случае сбоев или других непредвиденных обстоятельств [1].

В то же время существует проблема оптимизации производственных мощностей, связанная с несоответствием номинальных характеристик роботов-манипуляторов и их реальной работы, из-за чего теоретически оптимальный план работ может не совпадать с реальной картиной событий [2].

Современные системы мониторинга позволяют определять загруженность оборудования и давать рекомендации человеку-оператору по оптимизации процесса [3-4], однако это сопряжено с повышенным риском ошибок и задержек в принятии решений из-за человеческого фактора.

В статье предложен вариант распределения задач на основе диффузионного алгоритма [5-7], применяемого в параллельных вычислительных схемах. Ключевым отличием производственного процесса является невозможность параллельной обработки заготовки, а сами операции должны выполняться в однозначной последовательности, что требует алгоритмической адаптации.

Теоретическая часть

Диффузионный метод распределения задач позволяет создать универсальный алгоритм для неопределенного числа манипуляторов без написания исходного кода для каждой длины цепочки по отдельности.

Будем считать, что о системе известна следующая информация: n - число манипуляторов; k - число задач; t_i– время выполнения задачи, сек. (i=1...k). Зная это, можно представить распределение задач в общем виде:

$$T_1 = [t_1, t_2, \dots, t_a]$$
$$T_2 = [t_{a+1}, t_{a+2}, \dots, t_{a+b}] \quad (1)$$
$$\dots$$
$$T_n = [t_c, t_{c+1}, \dots, t_k]$$

Отдельно стоит отметить, что задачи задаются последовательно, что усложняет сортировку элементов, не позволяя распределить их в каком-либо порядке.

Очевидно, что целевое значение времени работы манипуляторов можно определить как:

$$T_{\text{ср}} = \frac{T_{sum}}{k} \quad (2)$$

где T_{sum} - суммарное время выполнения всех задач.

Фактически это недостижимо, так как разбить время выполнения одной операции невозможно и в дальнейшем критерий оптимизации качества можно считать мерой приближения к этому значению.

Элементарная операция балансировки нагрузки

Исходя из того, что последовательность задач жестко фиксирована, то при передаче объекта с одного манипулятора на другой можно выделить два положения:

1. Передача груза осуществляется только между соседними манипуляторами;
2. При передаче груза с текущего манипулятора на следующий передается последняя в очереди задача, а в новом манипуляторе она становится первой.

Этот процесс проиллюстрирован на рисунке 1.

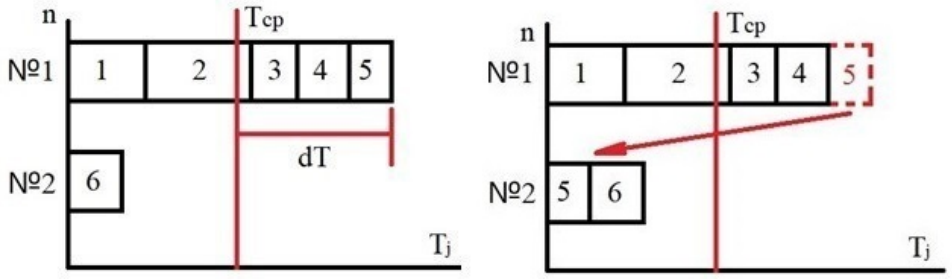


Рисунок 1 — Распределение нагрузки при передаче между соседними манипуляторами

Оптимизация проводится по следующим правилам:

– сначала вся нагрузка переносится на первый манипулятор за исключением последней задачи – так как каждый манипулятор должен выполнить хотя бы одну задачу;

– далее начинается цикл с неограниченным числом итераций, на каждом круге которого осуществляется перемещение одного элемента по описанным выше принципам, а также проверка оптимальности распределения по критерию:

$$\max(T_1, T_2) < \max\left(T_{1\,past}, T_{2\,past}\right) \quad (3)$$

где $T_{1\,past}, T_{2\,past}$ – значения общего времени выполнения задачи до последней смены.

– если условие (2) не выполняется, то оптимальное распределение соответствует предыдущему значению, а сам цикл настройки прерывается.

Масштабирование алгоритма распределения

Рассмотренный выше алгоритм можно масштабировать на цепочку из большего числа манипуляторов, если представить решение глобальной задачи оптимизации как набор локальных задач.

В этом случае распределение нагрузки между двумя манипуляторами не привязано к конкретным порядковым номерам, а представляет собой «плавающее окно», последовательно обходящее все пары манипуляторов (рис. 2).

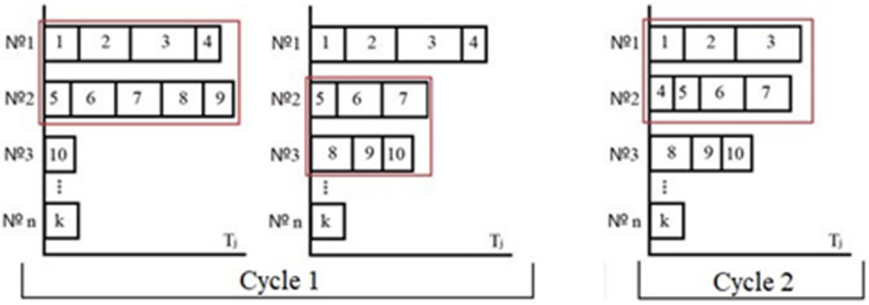


Рисунок 2 — Циклическая оптимизация нагрузки

```
 k        33    n       6
manipulator    № 1 428.7
manipulator    № 2 411.9
manipulator    № 3 433.2
manipulator    № 4 405.30000000000007
manipulator    № 5 375.1
manipulator    № 6 343.9
average working time        399.68333333333334
mismatch with the average time in  sec.          33.51
mismatch with the average time as a %       8.385805
Tend[0]
[95.5, 52.6, 64.2, 51.7, 89.2, 75.5]
Tend[1]
[84.2, 52.3, 54.0, 54.3, 88.6, 78.5]
Tend[2]
[85.9, 76.4, 89.6, 66.5, 55.2, 59.6]
Tend[3]
[97.3, 76.8, 77.7, 78.9, 74.6]
Tend[4]
[79.5, 51.8, 91.9, 99.0, 52.9]
Tend[5]
[72.3, 54.1, 83.5, 77.8, 56.2]
```

Рисунок 3 — Пример реализации задачи распределения

Для цепочки произвольного размера порядок распределения будет следующим:

1. Начиная с последнего, передается одна задача всем манипуляторам, кроме первого (также начиная с конца).
2. Затем проводится локальная оптимизация нагрузки пары ближайших манипуляторов, после чего окно сдвигается на один шаг, охватывая последний настроенный манипулятор и следующий за ним.

После перебора всех пар окно перемещается на первый и цикл повторяется.

3. Остановка происходит после достижения оптимальных значений изначально на каждом локальном цикле оптимизации (в каждом окне), т.е. все локальные соотношения будут оптимальными.

На рисунке 3 представлен пример моделирования распределения нагрузки для цепочки из шести манипуляторов для тридцати трех задач, при этом потеря времени относительно оптимального значения не превышает 9%.

Также тестовое моделирование показало, что несоответствие идеальному показателю времени может быть уменьшено при увеличении количества задач. Т.е. при разбиении одной сложной, трудоемкой задачи на подзадачи, которые можно перераспределить по манипуляторам, конечная разница между эталонными и фактическими значениями минимизируется.

Введение индикатора производительности манипулятора

Если в производственной цепочке присутствуют манипуляторы различных моделей или манипуляторы с ухудшенными параметрами, то скорость их работы может отличаться от номинальной. В результате, если эти отклонения наблюдаются, то в алгоритм оптимизации можно заложить фактор замедления работы от манипулятора, при этом показатели считать измеренными относительно эталонного манипулятора – с показателем производительности, равным 100%.

Тогда показатель общего времени работы для каждого манипулятора можно рассчитать, как

$$T_{j\,mod} = T_j / p_j \tag{4}$$

где p_j – показатель задержки для каждого манипулятора.

То же среднее время работы, деленное на среднюю задержку, можно использовать в качестве метода оценки качества.

$$T_{\text{ср}\,mod} = T_{\text{ср}} / p_{\text{ср}} \tag{5}$$

Особый интерес представляет тот факт, что введение дополнительного множителя оценки производительности на уровне локального цикла оптимизации нагрузки между двумя манипуляторами дает программе достаточно информации для перераспределения задач таким образом, чтобы большее их количество (или наиболее трудоемкие операции) были привязаны к наиболее эффективным манипуляторам, что часто помогает сократить время рассогласования с эталонным значением скорости работы. В качестве примера на рисунке 4 показан отчет для цепочки из предыдущего абзаца с добавлением асимметрии производительности.

```
 k       33   n       6
manipulator performance [0.815, 0.828, 0.98, 0.864, 0.941, 0.974]
manipulator   № 1 599.7546012269939
manipulator   № 2 557.0048309178745
manipulator   № 3 466.02040816326536
manipulator   № 4 470.3703703703703
manipulator   № 5 433.6875664187035
manipulator   № 6 386.8583162217659
average working time in sec. .93298778230286
mismatch with the average time in seconds 7.867012217697152
mismatch with the average time as a  % 1.6357813702848352
Tend[0]
[64.2, 85.0, 99.5, 82.4, 81.4, 76.3]
Tend[1]
[79.5, 59.3, 89.0, 78.4, 56.1, 98.9]
Tend[2]
[95.9, 51.5, 83.4, 70.0, 66.5, 89.4]
Tend[3]
[94.6, 71.3, 92.5, 76.7, 71.3]
Tend[4]
[85.0, 66.1, 75.9, 88.4, 92.7]
Tend[5]
[82.1, 87.4, 52.4, 71.5, 83.4]
```

Рисунок 4 — Пример реализации задачи распределения с асимметрией производительности

В результате, наблюдаемость векторов длительности работы и состояния производительности позволяет полностью автоматизировать процесс оптимизации нагрузки.

Результаты экспериментальных исследований

Работоспособность алгоритма проверена с использованием результатов моделирования в среде MatLab. В качестве элементарного объекта выбран обобщенный манипулятор со значимыми параметрами в виде списка задач и производительности, заданными для каждого отдельного манипулятора. При этом отсутствует привязка к конкретному варианту реализации манипулятора и, как следствие, отсутствует отслеживание траекторий перемещения и т.п.

Рассматривается только последовательная цепочка, функционирующая по следующим принципам:

– для начала работы манипулятору требуется заготовка (объект) и он не должен быть занят хранением промежуточной продукции (результата работы), т.е. пустым, при получении заготовки единица продукции изымается из нижестоящего манипулятора или буфера для промежуточного хранения;

– для каждого манипулятора в окне скрипта можно задать последовательности операций, характеризующиеся длительностью в виде матрицы.

В качестве контролируемого параметра можно наблюдать выходной процесс на последнем манипуляторе — подсчитывать количество суммарных условных изделий, либо подробно рассматривать графики изменения параметров каждого манипулятора в отдельности, включая: текущую степень завершения операции, номер выполняемой операции, сигнал готовности, сигнал загрузки, сигнал состояния ремонта (в данном эксперименте не используется).

На рисунке 5 представлен блок, моделирующий производственный процесс отдельного манипулятора.

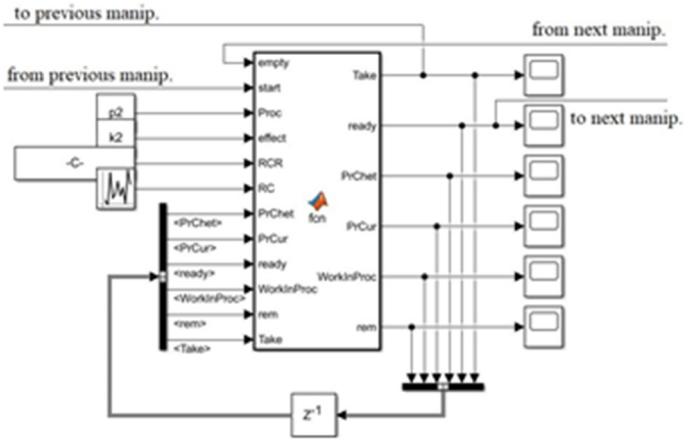


Рисунок 5 — Блок имитации работы манипулятора

Для корректной работы необходимы шесть типов сигналов:

1. «пустой» — сигнал о том, что следующий по списку манипулятор готов принять результат работы текущего манипулятора.

2. «старт» — сигнал о готовности предыдущего по списку манипулятора передать результат работы текущему манипулятору.

3. «Proc» — вектор задач P.

4. «effect» — показатель производительности манипулятора k.

5. «RCR», «RC» — показатели нестабильности работы манипулятора, характеризующие вероятность отказа и время восстановления, для текущей демонстрации приняты равными нулю.

Пункты 3-5 являются константами и не изменяются в процессе эксплуатации, точки 1-2 являются сигналами связи между манипуляторами и служат для координации их работы.

Цепочка из четырех последовательно соединенных между собой манипуляторов примет вид, показанный на рисунке 6.

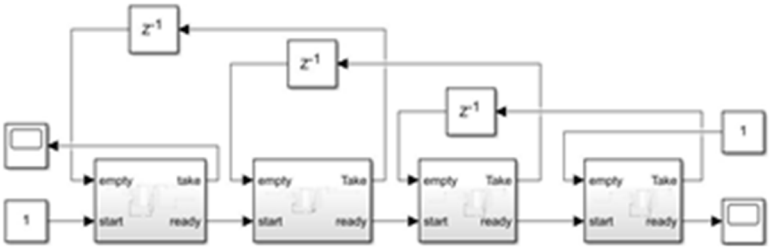


Рисунок 6 — Цепочка для экспериментального моделирования

Исходные данные для экспериментального моделирования приведены в таблице 1. Оба параметра задаются в виде нераспределенных массивов.

На ее основе проведено два модельных эксперимента. Первый — с неоптимизированными параметрами, распределение задач осуществляется равномерно по их количеству. Второй — оптимизированный, распределение задач осуществляется по принципам, описанным выше. Результаты обоих распределений представлены в таблицах 2-3.

Как видно из распределения в таблицах 2-3, при неоптимизированном распределении двадцать четыре задачи перекладываются на четыре манипулятора равномерно, не учитывая ни их собственные затраты, ни возможности манипуляторов, а в процессе оптимизации нагрузка с заведомо неэффективного манипулятора четыре снималась и перенаправлялась на манипулятор три, который, в свою очередь, получив избыточную нагрузку, отдал часть своей работы манипулятору два и т.д.

Таблица 1 — Исходные массивы данных

Параметр	**Величина**
p, sec.	[60.6, 69.1, 86.6, 60.2, 58.3, 67.3, 65.8, 79.0, 54.5, 75.2, 73.2, 63.5, 75.9, 85.3, 70.7, 71.3, 57.4, 75.7, 85.0, 82.2,91.3,69.8,80.1,77.5]
k	[0.84, 0.937, 0.813, 0.52]

Таблица 2 — Неоптимизированное распределение задач

Параметр	**Величина**			
№	1	2	3	4
k	0.84	0.937	0.813	0.891
p, sec.	[60.6, 69.1, 86.6, 60.2, 58.3, 67.3]	[65.8, 79.0, 54.5, 75.2, 73.2, 63.5]	[75.9, 85.3, 70.7, 71.3, 57.4, 75.7]	[85.0, 92.2, 91.3, 89.8, 80.1, 77.5]

Таблица 3 — Оптимизированное распределение задач

Параметр	**Величина**			
№	1	2	3	4
k	0.84	0.937	0.813	0.891
p, sec.	[60.6, 69.1, 86.6, 60.2, 58.3, 67.3, 65.8]	[79.0, 54.5, 75.2, 73.2, 63.5, 75.9, 85.3]	[70.7, 71.3, 57.4, 75.7, 85.0, 82.2]	[91.3, 69.8, 80.1, 77.5]

В процессе моделирования были получены результаты, подтверждающие теоретические предположения. Согласно данным Таблицы 4, на моделирование было затрачено 10 000 секунд. Оптимизированная система произвела 14 единиц, а неоптимизированная — 8 единиц.

Причиной такой разницы стало максимальное время простоя оборудования, которое для оптимизированной системы составляет 122 секунды. для локального производственного цикла, а для неоптимизированной — 554 секунды.

Таблица 4 — Результаты моделирования

Параметр	**Величина**	
Тип системы	Opt.	Non-opt.
продукция	14	8
Время простоя, sec.	[1,17,17,122]	[514,554,458,1]

Для наглядности результаты моделирования продемонстрируем на графиках манипуляторов (рис. 7), которые вызывают максимальный простой линии. Возрастающая кривая отображает процессы выполнения каждой отдельной задачи, а ее предельное значение больше номинального на величину, обратно пропорциональную КПД манипулятора. Пропуски в установившемся процессе (когда все манипуляторы последовательно вступили в работу) свидетельствуют о простоях оборудования из-за загруженности линии.

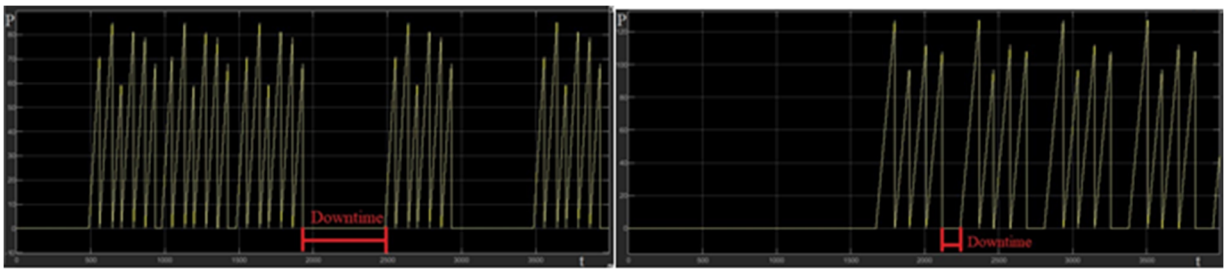


Рисунок 7 — График работы манипулятора

Заключение

В результате проделанной работы разработан алгоритм распределения задач для группы разнородных манипуляторов, функционирующий в режиме реального времени, способный реагировать на изменение состава системы.

Алгоритм был проверен путем моделирования производственной цепочки.

Дальнейшее развитие данной темы — интеграция алгоритмов оптимизации в сложную систему управления технологическим процессом с возможностью динамического реагирования на изменение конфигурации системы.

Литература

1. N. Yadav and S. P. Panda, «A Path Forward for Automation in Robotic Process Automation Projects: Potential Process Selection Strategies», 2022 International Conference on Machine Learning, Big Data, Cloud and Parallel Computing (COM-IT-CON), Faridabad, India, 2022, pp. 801-805, doi: 10.1109/COM-IT-CON54601.2022.9850739.

2. Tian M-W, Yan S-R, Mohammadzadeh A, Tavoosi J, Mobayen S, Safdar R, Assawinchaichote W, Vu MT, Zhilenkov A. Stability of Interval Type-3 Fuzzy Controllers for Autonomous Vehicles. Mathematics. 2021; 9(21):2742. https://doi.org/10.3390/math9212742.

3. Istiadi, E. B. Sulistiarini, R. Joegijantoro, A. N. Suksmawati, K. S. Nugroho and I. Akbar, «Expert System Integrated with Medical Record for Infectious Diseases using Certainty Factor», 2022 IEEE International Conference on Cybernetics and Computational Intelligence (CyberneticsCom), Malang, Indonesia, 2022, pp. 451-456, doi: 10.1109/CyberneticsCom55287.2022.9865639.

4. Zhilenkov, Anton. «GaN Materials Nanostructures Growth Control in the Epitaxial Units». Solid State Phenomena 265 (2017): 627 - 630.

5. H. Kaiyuan, Y. Xueshun, L. Keyan, J. Dongli, Z. Huiyu and W. Chengzhong, «Non-Intrusive Load Monitoring Based on Data Correlation for Distribution Network», 2021 China International Conference on Electricity Distribution (CICED), Shanghai, China, 2021, pp. 488-483, doi: 10.1109/CICED50259.2021.9556692.

6. X. Tang, Y. Liu, Y. Hu, R. Dai, S. Zhao and Z. Sun, «Process Management for Distribution Networks' Graph Modification Tasks in PMS 2.0 System», 2018 China International Conference on Electricity Distribution (CICED), Tianjin, China, 2018, pp. 179-183, doi: 10.1109/CICED.2018.8592495.

7. A. A. Zhilenkov, D. D. Gilyazov, I. I. Matveev and Y. V. Krishtal, «Power line communication technologies in automated control systems», 2017 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), St. Petersburg and Moscow, Russia, 2017, pp. 246-249, doi: 10.1109/EIConRus.2017.7910539.

8. Yan, S.-R.; Alattas, K.A.; Bakouri, M.; Alanazi, A.K.; Mohammadzadeh, A.; Mobayen, S.; Zhilenkov, A.; Guo, W. Generalized Type-2 Fuzzy Control for Type-I Diabetes: Analytical Robust System. Mathematics 2022, 10, 690. https://doi.org/10.3390/math10050690.

Информация об авторе

Воронцов Дмитрий Николаевич, Санкт-Петербургский Государственный Морской Технический Университет (СПБГМТУ), Россия, 190121, Санкт-Петербург, Лоцманская ул., д. 3, dn.voronzov@mail.ru

Особенности проектирования горнотехнических систем с автономным и дистанционно управляемым оборудованием в связи с добычей твердых полезных ископаемых подземным способом в условиях экстремальных сред

Д.Н. Радченко✉, В.С. Федотенко, А.П. Аверин
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук (ИПКОН РАН), Москва, Россия, mining_expert@mail.ru

Аннотация
Современная горная промышленность характеризуется высоким уровнем автоматизации производства и широким набором современных технических средств, работающих, в том числе, автономно. Среди таких – роботизированные автосамосвалы в карьерах и подземных рудниках, погрузочно-доставочные машины, буровые установки и т.п. Роботизация в горной промышленности, где труд человека сопряжен с постоянным риском для жизни, является приоритетом. Вместе с тем, рост потребления минерального сырья и невозобновляемость геологических ресурсов в масштабах исторического времени приводят к неизбежному росту глубины горных работ. Добыча твердых полезных ископаемых на сверхбольших глубинах (количество глубоких шахт) во всем мире будет расти, согласно росту объемов промышленного производства. Для всех без исключения горнодобывающих компаний в мире, рост глубины горных работ влечет потребность в изыскании решений, позволяющих максимально снизить влияние человеческого фактора в технологических процессах, осуществляемых в горных выработках на большой глубине. Новые роботизированные комплексы оборудования призваны обеспечить высокопроизводительную работу в условиях экстремальных сред – высоких температур, риска газовыделений, пониженного содержания кислорода, завалов и обрушений горной массы. Безопасная работа робототехнического средства, исключающая его утрату вследствие непрогнозируемых и неконтролируемых явлений, обеспечивается сопряжением с датчиками о состоянии массива горных пород, а также комплексом вспомогательного роботизированного оборудования, непрерывно обследующего очистное пространство и своевременно устраняющее угрозы аварийного развития ситуации. Создание облика подземного робота и вспомогательных роботизированных средств мониторинга и контроля базируется на положении, что экстремальная подземная среда не рассматривается как постоянная угроза, но рассматривается как естественная рабочая обстановка, в которой ведется непрерывное извлечение полезного ископаемого. На этом основано обоснование модулей базовых платформ, модулей целевой нагрузки и средств обеспечения и обслуживания в их взаимосвязи и привязке к конкретным условиям ведения очистных работ.

Ключевые слова
Горные предприятия, проектирование горнотехнических систем, роботизация, автономное оборудование, дистанционно управляемое оборудование, подземный рудник, экстремальная среда, добыча полезных ископаемых.

Благодарности
Исследования выполняются в рамках базового бюджетного финансирования ИПКОН РАН учредителем – Минобрнауки России (тема FMMS-2024-0010).

Design features of mining engineering systems with autonomous and remotely controlled equipment in connection with the transition of underground mines to mining in extreme environments

Dmitry N. Radchenko✉, Victor S. Fedotenko, Andrey P. Averin
Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences (IPKON RAS), Moscow, Russia, mining_expert@mail.ru

Abstract
The modern mining industry is characterized by a high level of production automation and a wide range of modern technical means, including autonomous ones. Among these are robotic dump trucks in quarries and underground mines, loading and delivery machines, drilling rigs, etc. Robotization in the mining industry, where human labor is associated with constant risk to life, is a priority. At the same time, the increase in the consumption of mineral raw materials and the non-renewable nature of geological resources on the scale of historical time lead to an inevitable increase in the depth of mining operations. Extraction of solid minerals at extremely deep depths (number of deep mines) It will grow worldwide, according to the growth of industrial production. For all mining companies in the

world, without exception, the increase in the depth of mining operations entails the need to find solutions that maximize the impact of the human factor in the technological processes carried out in mining at great depth. New robotic equipment complexes are designed to ensure high–performance operation in extreme environments - high temperatures, risk of gas emissions, low oxygen content, blockages and rock collapses. The safe operation of the robotic means, excluding its loss due to unpredictable and uncontrolled phenomena, is ensured by coupling with sensors on the state of the rock mass, as well as a complex of auxiliary robotic equipment that continuously examines the cleaning space and timely eliminates the threat of an emergency situation. The creation of the appearance of an underground robot and auxiliary robotic monitoring and control tools is based on the position that the extreme underground environment is not considered as a constant threat, but is considered as a natural working environment in which continuous extraction of minerals is carried out. This is the basis for the justification of the modules of the base platforms, the modules of the target load and the means of provision and maintenance in their interrelation and binding to the specific conditions of cleaning operations.

Key words
Mining enterprises, design of mining systems, robotics, autonomous equipment, remotely controlled equipment, underground mine, extreme environment, mining.

Acknowledgements
The research is carried out within the framework of the basic budget financing of the IPCON RAS by the founder – the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (topic FMMS-2024-0010).

Введение

Рост потребления минерального сырья и невозобновляемость геологических ресурсов в масштабах исторического времени приводят к неизбежному росту глубины горных работ. Некоторые карьеры превысили отметку по глубине в 1 км, а добыча полезных ископаемых в подземных условиях, например, в ЮАР, ведется на глубинах более 4 км (табл.1).

Таблица 1 — Примеры глубочайших действующих подземных рудников мира

№ п/п	Название подземного рудника	Глубина ведения горных работ, км	Страна	Ценный компонент
1	Mponeng Gold Mine	4,0	ЮАР	Au
5	Driefontein Mine	3,4	ЮАР	Au
6	Kusasalethu mine	3,4	ЮАР	Au
8	Kloof mine	3,3	ЮАР	Au, U
10	Blyvooruitzicht mine	3,2	ЮАР	Au, U
11	Moab Khotsong mine	3,05	ЮАР	Au, U
12	Kidd Mine	3,0	Канада	Cu, Zn
13	Laronde Mine	3,0	Канада	Au, Cu, Zn, Ag
14	Morro Velho	3,0	Бразилия	Au

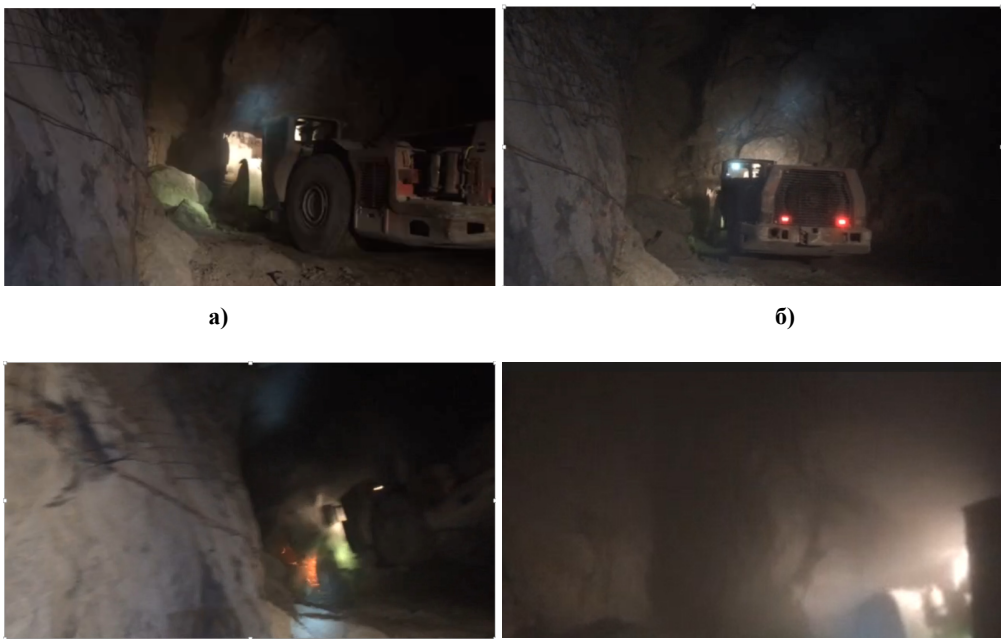
Параметры среды на глубоких подземных рудниках характеризуются, с точки зрения возможности нахождения человека, как экстремальные. Присутствие персонала в глубоких шахтах сопряжено с риском для жизни, ввиду высокой температуры окружающего массива (до 55-70^{0}С, табл.2), высокого атмосферного давления, повышенного риска прорыва высоконапорных флюидов в горные выработки. В России подземные рудники пока не относятся к сверхглубоким. Однако, компания Норильский Никель уже ведет добычу медно-никелевых руд на глубине, превышающей 2 км [1]. Даже на такой глубине все вышеперечисленные экстремальные условия ведения горных работ проявляются в полной мере.

Для всех без исключения горнодобывающих компаний в мире, рост глубины горных работ влечет потребность в изыскании решений, позволяющих максимально снизить влияние человеческого фактора в технологических процессах, осуществляемых в горных выработках на большой глубине. Среди передовых решений – дистанционное управление горной техникой, направляемой в забой оператором, находящимся в безопасной от обрушений зоне, а также внедрение автономной горной техники (погрузочно-доставочные машины, подземные автосамосвалы), работа которой корректируется из пунктов управления, расположенных на поверхности и даже в других городах.

Оценка условий работы автономной и дистанционно управляемой техники в забое

К особенностям работы автономного и дистанционно управляемого технологического оборудования в очистных забоях относится его пребывание в крайне сложной обстановке ввиду динамических форм проявления горного давления – стреляний, обрушений горной массы, внезапных завалов оборудования. Самые современные роботизированные средства производства при работе в забое не защищены от негативных явлений, связанных с риском обрушений горной массы, которые могут повлечь утрату оборудования.

В ходе проведения натурных исследований, целью которых являлось обоснование требований к системам управления автономных погрузочно-доставочных машин установлено, что в настоящее время работа полностью автономной ПДМ в забое при камерных высокопроизводительных системах разработки затруднена, либо невозможна при сохранении тех же подходов к созданию ковшовых погрузочно-доставочных машин. Эффективность очистной выемки до настоящего времени определяется квалификацией оператора автономной или дистанционно управляемой ПДМ. При этом не исключен риск утраты оборудования (рис. 1).



а) **б)**

в) **г)**

Рисунок 1 — Натурные исследования особенностей работы дистанционно управляемой ПДМ в забое, в ходе которых фиксировались инциденты, связанные с обрушениями горной массы: а) зачистка почвы; б) наполнение ковша, начало внезапного обрушения рудной массы; в) обрушение рудной массы; сопровождающееся искрением; г) погрузочно-доставочная машина под завалом

Одной из причин внезапных обрушений рудной массы на работающую в забое технику является низкая информативность о состоянии очистного пространства, доступ в которое человеку запрещен. Несмотря на то, что на большинстве современных предприятий обеспечивается лазерное сканирование очистного пространства из выработок вентиляционно-закладочного горизонта (рис. 2), полученных данных недостаточно для идентификации опасностей и предупреждения аварий, связанных с обрушениями горной массы.

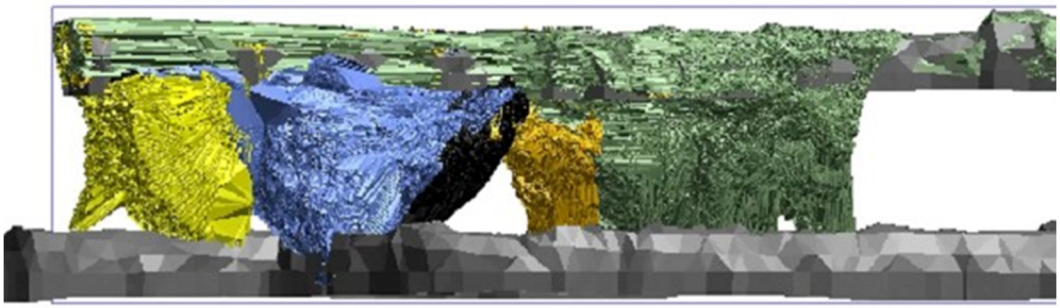
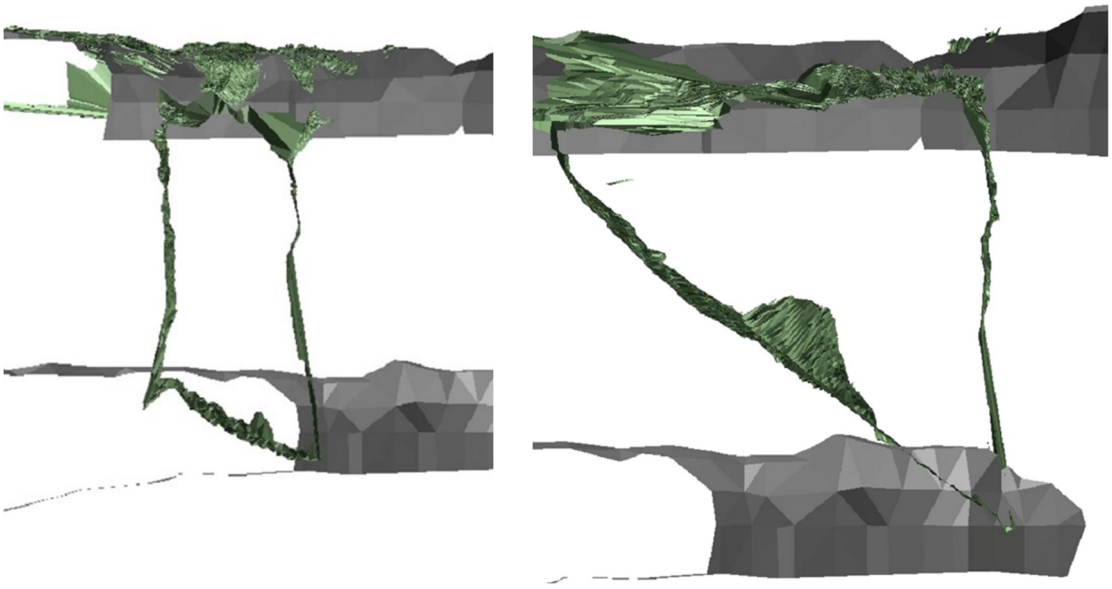


Рисунок 2 — Фрагмент модели месторождения по результатам лазерного сканирования подземных горных выработок: выработки вентиляционно-закладочного (серым цветом, сверху) и откаточного (серым цветом внизу) горизонтов; выработанное пространство подземных камер после выпуска отбитой рудной массы рудной

Это подтверждено в ходе сбора в 2023-2024 гг. и обработки данных лазерного сканирования более, чем 60 очистных камер. Изучение камер в сечении позволяет лишь приблизительно качественно оценить заколы,

зависания, куски негабаритной крупности, падение которых на погрузочно-доставочную машину может быть сопряжено с негативными (аварийными) последствиями (рис. 3). Так, анализ сечения выработанного пространства подземной камеры на рисунке 3а позволяет предположить, что в кровле камеры имеются зависания, в правой части образовался закол, который может обрушиться непосредственно на погрузочно-доставочную машину, а в донной части, на развале рудной массы расположен кусок отбитой руды негабаритной крупности. По данным рис. 3, б можно констатировать зависания в кровле и неоднородность на поверхности выпускаемой рудной массы, которая может привести к внезапному обрушению на погрузочно-доставочную машину.



а) **б)**

Рисунок 3 — Оценка состояния выработанного пространства подземной камеры (сечение) по результатам лазерного сканирования

Результаты проведенных исследований позволили выявить особенности и сформулировать требования к проектированию горнотехнических систем при применении автономной и дистанционно управляемой горной технике.

Особенности проектирования горнотехнических систем с автономным и дистанционно управляемым оборудованием

Анализ этапов и принципов роботизации горнодобывающего оборудования для подземных горных работ позволяет заключить, что в мировой практике суть создания подземной автономной машины всегда сводится к выводу оператора, вплоть до исключения кабины машиниста из конструкции и оснащению горной машины перечнем необходимых средств для автономной работы. При этом перечень технологических операций остается неизменным. Не меняются конструктивные параметры систем подземной разработки – порядок проходки горных выработок и отработки запасов выемочной единицы. Отсутствует рост производительности в связи с цикличностью процессов бурения, заряжания, отбойки, выпуска и доставки горной массы. Это связано с тем, что именно горные машины определяют всю технологию добычи руды, но современные автономные горные машины повторяют технический результат, достигнутый при эксплуатации техники в эпоху управления машинистом со всеми ограничениями по применению.

Роботизация отдельной единицы оборудования, например, погрузочно-доставочной машины, не имеет смысла. Для обеспечения безопасных условий выемочной машины необходимо автономное исследование очистных пространств со своевременной идентификацией опасностей и изысканию путей по их ликвидации, либо выводу оборудования из забоя во избежание аварийных ситуаций. То есть основными первоочередными исследовательскими задачами для снижения риска аварий на подземных рудниках являются:

– обоснование требований к облику подземных роботов, непосредственно занятых на извлечении полезного ископаемого из забоя;

– обоснование требований к вспомогательным устройствам - автономным средствам непрерывного мониторинга состояния экстремальной среды, обеспечивающих своевременную идентификацию опасностей и предупреждение развития аварийных ситуаций.

Первая задача может быть решена на базе биоинспирированных решений. К ним относятся способность живых организмов перемещаться под землей и выбираться из завалов, организовывать систему тоннелей, способность сбросить защитную оболочку и переместиться в безопасную зону с сохранением жизненно важных частей тела и органов.

Решение второй задачи связано с созданием беспилотных средств непрерывного, либо систематического мониторинга состояния динамично изменяющегося очистного пространства со своевременным выявлением опасностей. При этом необходимо обоснованием методов и средств устранения выявленных опасностей в очистных пространствах, доступ в которые человеку запрещен.

Комплексное решение этих двух взаимосвязанных задач базируется на создании систем управления группы роботов, которые работают в экстремальных средах подземных рудников. Реализация систем координации и обмена информацией между несколькими роботами, настройка иерархии задач, позволяющая роботам автономно принимать решения и взаимодействовать друг с другом.

Новые роботизированные комплексы оборудования призваны обеспечить высокопроизводительную работу в условиях экстремальных сред – высоких температур, риска газовыделений, пониженного содержания кислорода, завалов и обрушений горной массы. Безопасная работа робототехнического средства, исключающая его утрату вследствие непрогнозируемых и неконтролируемых явлений, обеспечивается сопряжением с датчиками о состоянии массива горных пород, а также комплексом вспомогательного роботизированного оборудования, непрерывно обследующего очистное пространство и своевременно устраняющее угрозы аварийного развития ситуации. Создание облика подземного робота и вспомогательных роботизированных средств мониторинга и контроля базируется на положении, что экстремальная подземная среда не рассматривается как постоянная угроза, но рассматривается как естественная рабочая обстановка, в которой ведется непрерывное извлечение полезного ископаемого. На этом основано обоснование модулей базовых платформ, модулей целевой нагрузки и средств обеспечения и обслуживания в их взаимосвязи и привязке к конкретным условиям ведения очистных работ.

Литература

1. Солуянов Н. О., Цымбалов А. А., Кузьмин С. В., Давыдов А. А. Анализ исходных данных при построении геомеханической модели шахты «Глубокая» рудника «Скалистый» в контуре залежи богатых руд С-6 Октябрьского месторождения // Горный журнал, 2023. -№6. –С.5-11.
2. Электронный ресурс. Режим доступа https://www.rocktechnology.sandvik/en/ Дата обращения 31.10.2024 г.

Информация об авторах

Радченко Дмитрий Николаевич, доцент, к.т.н., заведующий Лабораторией теоретических основ проектирования горнотехнических систем, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук (ИПКОН РАН), Россия, 111020, Москва, Крюковский туп., 4, mining_expert@mail.ru, ORCID: 0000-0003-1821-3840

Федотенко Виктор Сергеевич, д.т.н., заведующий Отделом теории проектирования и геотехнологии комплексного освоения недр, ИПКОН РАН, Россия, 111020, Москва, Крюковский туп., 4, victorfedotenko@gmail.com, ORCID: 0000-0002-2082-6040

Аверин Андрей Петрович, к.т.н., с.н.с. Лаборатории многофазных процессов в массивах горных пород при разработке месторождений, ИПКОН РАН, Россия, 111020, Москва, Крюковский туп., 4, averin.andrey@gmail.com

Топологическая оптимизация экзоскелетного каркаса

И.С. Барынкин
Государственный научный центр Российской Федерации «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики» (ГНЦ РФ ЦНИИ РТК), Санкт-Петербург, Россия, ivan.barynkin08@gmail.com

Аннотация
Целью работы является снижение массы экзоскелетного каркаса с использованием методов топологической оптимизации. Для этого необходимы нагрузки, действующие на каркас, а также область пространства, в которой будет происходит оптимальное перераспределение материала. Проводится оценка ресурса узлов изделия для установления необходимости в замене материала изготовления более нагруженных компонентов. Для этого учитывались свойства материала изготовления компонентов экзоскелетного каркаса – сплав Д16Т. Одним из таких свойств была усталость прочность материала и соответствующая ей кривая. Результаты работы показали, что напряжения в каждом из узлов возрастают, если перемещаться сверху вниз от сегмента к сегменту. Результатом оптимизации стало облегчение конструкции на 892 грамма или около 8% от изначального веса. При «активизации» экзоскелета, под которой подразумевается установка электроприводом, сниженная масса будет способствовать не только легкости, но и большему времени автономной работы, так как приводам потребуется меньший электрический ток для разгона и установки сегмента экзоскелета нужно положении.

Ключевые слова
Экзоскелет, биомеханика, экзоскелетный каркас, циклические нагрузки, усталость материала.

Благодарности
Результаты получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России 2024 года № 075-00697-24-01 1021101316102-1-2.2.2 «Промышленный экзоскелетный комплекс с активными приводами и пассивными элементами разгрузки для повышения функциональных возможностей оператора при работе с тяжелым инструментом» (FNRG-2022-0020).

Topological optimization of the exoskeletal frame

Ivan S. Barynkin
Russian state scientific center for robotics and technical cybernetics, St. Petersburg, Russia, ivan.barynkin08@gmail.com

Abstract
The goal of the work is to reduce the mass of the exoskeleton frame using topological optimization methods. This requires loads acting on the frame, as well as an area of space in which optimal redistribution of the material will occur. The service life of product components is assessed to determine the need to replace the material used to manufacture components that are more loaded. For this purpose, the properties of the material used to manufacture the components of the exoskeleton frame – D16T alloy – were taken into account. One of these properties was the fatigue strength of the material and its corresponding curve. The results of the work showed that the stresses in each of the nodes increase if you move from top to bottom from segment to segment. The result of optimization was a lightweight design by 892 grams, or about 8% of the original weight. When “activating” the exoskeleton, which refers to installation by an electric drive, the reduced mass will contribute not only to lightness, but also to longer battery life, since the drives will require less electrical current to accelerate and install the exoskeleton segment in the desired position.

Key words
Exoskeleton, biomechanics, exoskeleton frame, cyclic loads, material fatigue.

Acknowledgements
The results were obtained within the framework of the state task of Russian Ministry of Education and Science in 2024 № 075-00697-24-01 1021101316102-1-2.2.2 «Industrial exoskeleton with active drives and passive unloading elements for increasing the functionality of the operator during working with heavy tools» (FNRG-2022-0020).

Введение

В настоящее время, одним из направлений развития экзоскелетных конструкций является снижение массы устройств. Снижение массы способствует увеличению времени автономной работы активного экзоскелета, а также упрощает транспортировку изделия в выключенном состоянии. В данной работе для снижения массы конкретного экзоскелетного каркаса использовалась топологическая оптимизация – метод, оптимизирующий

расположения материала в заданном проектном пространстве при заданных нагрузках, с целью снижения массы компонента без существенной потери прочностных свойств.

Нагрузки

Для задания нагрузок использовались данные работы [1]. В результате задания движения математической модели, описанной в виде системы уравнений динамики, были получены зависимости нагрузок. Следует отметить циклических характер нагрузок (рис. 1-4), максимальные значения достигаются при опоре на ногу, минимальные при её выносе. В дальнейшем будет произведен учет циклического характера нагрузок при оценке ресурса узлов экзоскелетного каркаса.

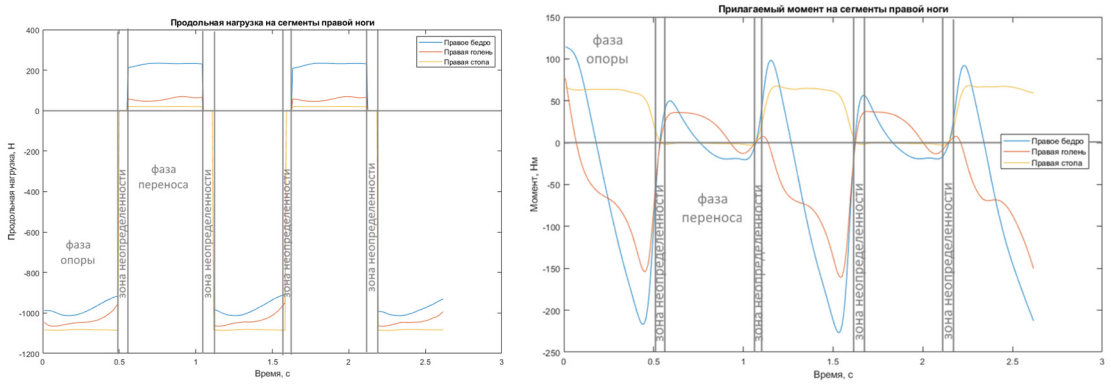


Рисунок 1-2 — Продольная нагрузка и изгибающий момент на сегментах правой ноги

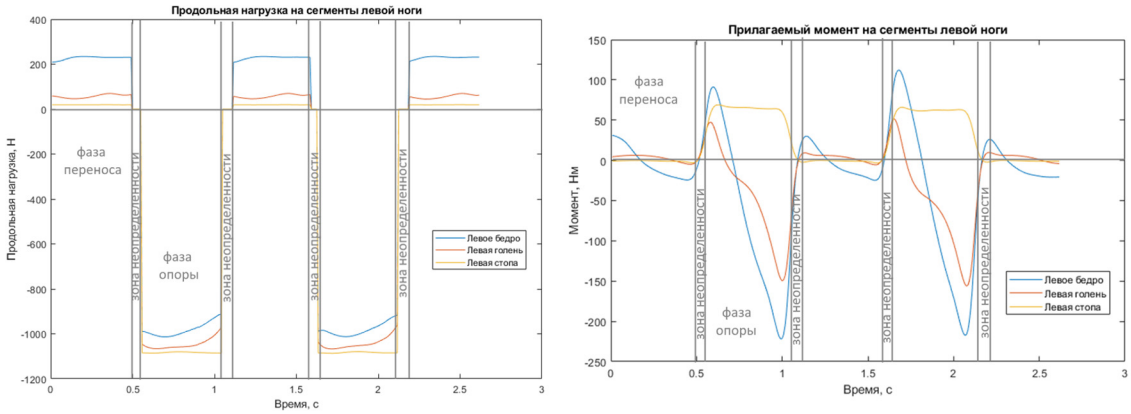


Рисунок 3-4 — Продольная нагрузка и изгибающий момент на сегменты левой ноги

Полученные результаты показывают, что на узлы экзоскелетного каркаса оказывается существенная циклическая нагрузка (табл. 1-2):

Таблица 1 — Продольные нагрузки на узлы экзоскелетного каркаса

	Максимальная нагрузка P_{max}, Н	**Минимальная нагрузка P_{min}, Н**
Стопа	20	-1085
Колено	70	-1067
Бедро	234	-1013

Таблица 2 — Моментные воздействия на узлы экзоскелетного каркаса

	Максимальный момент M_{max}, Нм	**Минимальный момент M_{min}, Нм**
Стопа	65	-2
Колено	40	-152
Бедро	100	-225

Свойства материала

В качестве материала был выбран алюминиевый сплав – Д16Т, из которого изготовлены листовые компоненты. Именно они будут подвергнуты топологической оптимизации, так как их форма относительно шарнирных узлов более простая, что позволит в будущем изготавливать оптимизированные версии при помощи ЧПУ станков вместо использования дорогой SLS печати. Свойства сплава Д16Т указаны в таблице 3 [2].

Таблица 3 — Свойства сплава Д16Т

Модуль Юнга E, МПа	**Модуль сдвига G, МПа**	**Предел пропорциональности $\sigma_{0,2}$, МПа**	**Плотность ρ, кг/м^3**	**Коэффициент Пуассона ν**
75000	30000	265	2770	0.3

Во время ходьбы, экзоскелетный каркас претерпевает воздействие циклических нагрузок, вызывающих циклические напряжения в конструкции. Поэтому необходимо учесть циклическую прочность материала. Для этого обратимся библиотеке материалов программного комплекса Ansys - granta design для поиска кривой усталости (рис. 5) сплава Д16Т.

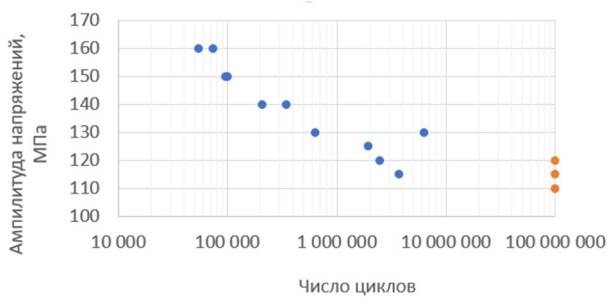


Рисунок 5 — Усталостные испытания алюминиевого сплава Д16Т

Данные свойства будут использоваться в модели материала конечно-элементного пакета Altair, а также при оценке количества циклов работы того или иного узла каркаса.

Конечно-элементные модели элементов каркаса, параметры оптимизации и результаты

В конечно-элементный пакет Altair была импортирована геометрия узлов экзоскелетного каркаса. Далее геометрия делилась на две зоны: подвергаемые оптимизации и остающиеся неизменными. К областям, которые не следует оптимизировать, были отнесены различные контактные поверхности с болтовыми соединениями и бандажами – фланцы и петли. На рисунках 6-9 серым цветом обозначены области, остающиеся нетронутыми, а зеленым цветом области, в которых будет происходить оптимизация.

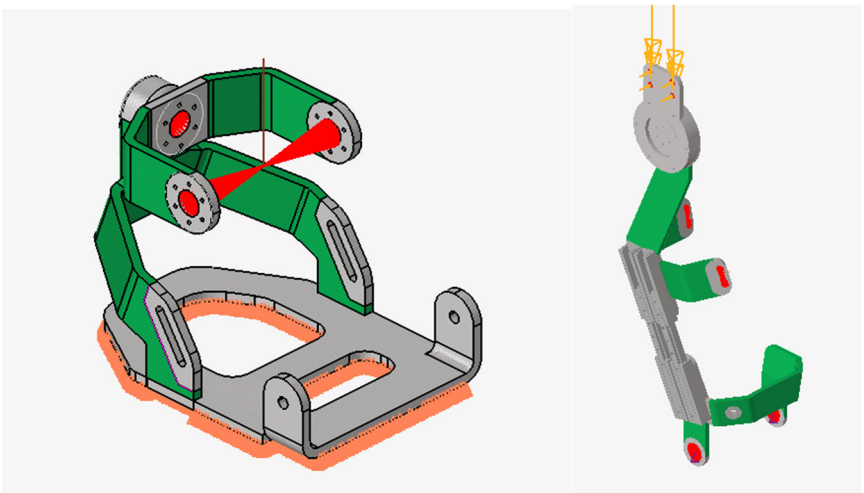


Рисунок 6-7 — Разделение областей и конечно-элементная модель узла стопы и голени

После чего на геометрию накладывалась конечно-элементная сеть с элементами тетрагональной формы 1-го порядка и размером 2мм. Болтовые соединения моделировались при помощи элемента RBE2. После к модели прикладывались нагрузки, ранее найденные по данным работы [1], а также накладывались ограничения на перемещения.

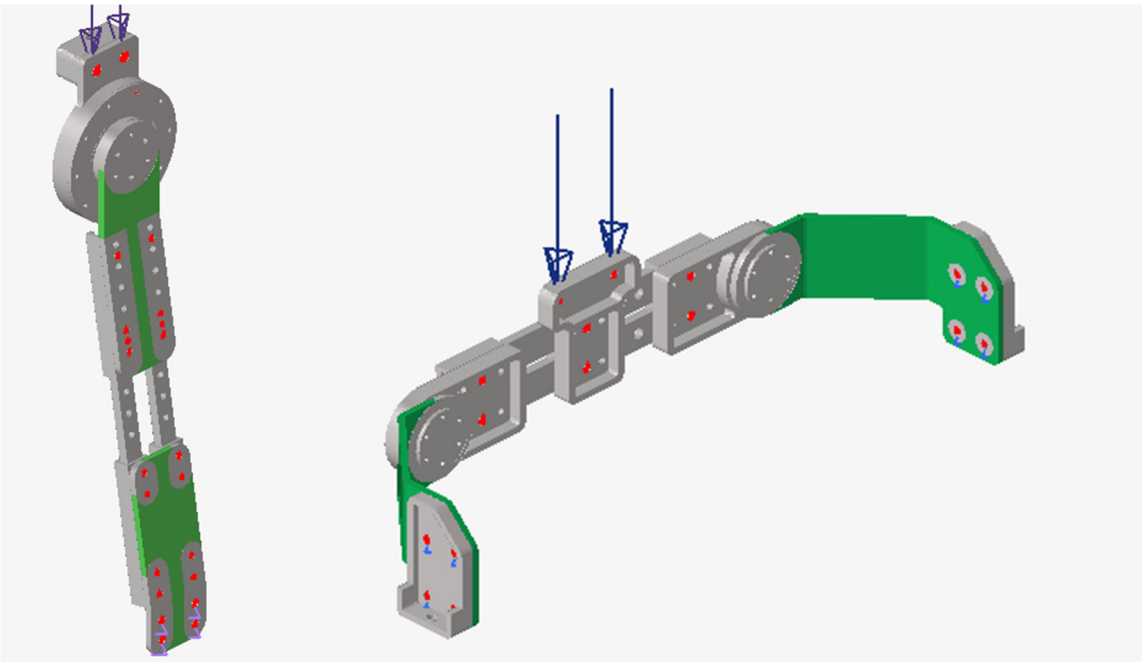


Рисунок 8-9 — Разделение областей и конечно-элементная модель узла бедра и пояса

В качестве цели оптимизации было выбрано снижение массы компонентов [3], при этом алгоритм был настроен на минимизацию податливости. Это оправдано тем фактом, что оси вращения шарнирных узлов должны строго совпадать с осями вращения суставов ОДА человека дабы экзоскелетный каркас не стеснял движений при использовании. Поэтому требуется минимальная деформация компонентов под воздействие нагрузок.

Результаты работы оптимизационного алгоритма представлены на рисунках 10-17:

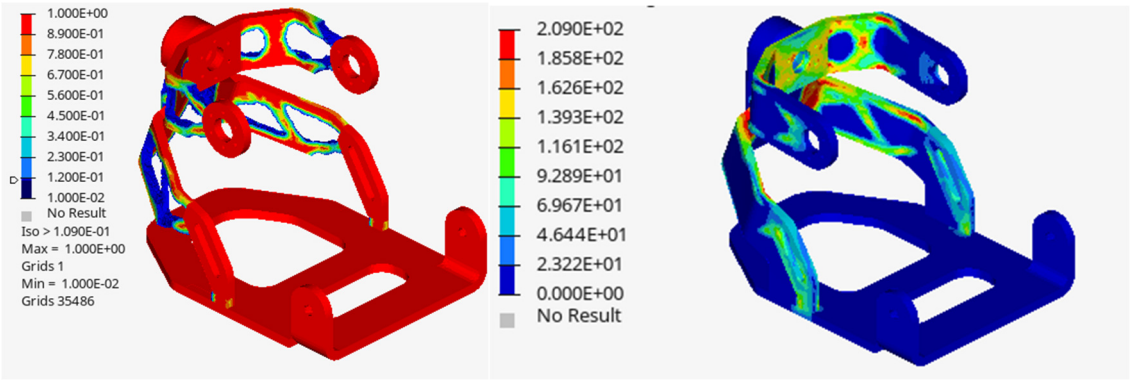


Рисунок 10-11 — Результаты оптимизации и поле напряжений узла стопы

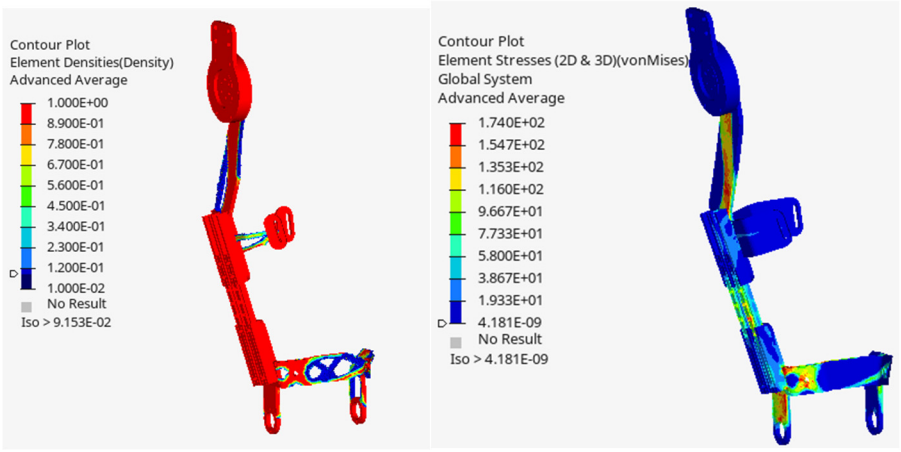


Рисунок 12-13 — Результаты оптимизации и поле напряжений узла голени

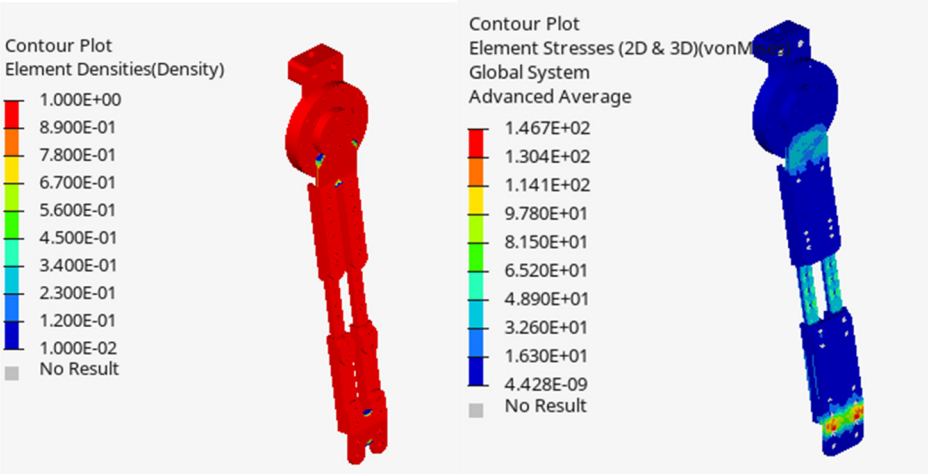


Рисунок 14-15 — Результаты оптимизации и поле напряжений узла бедра

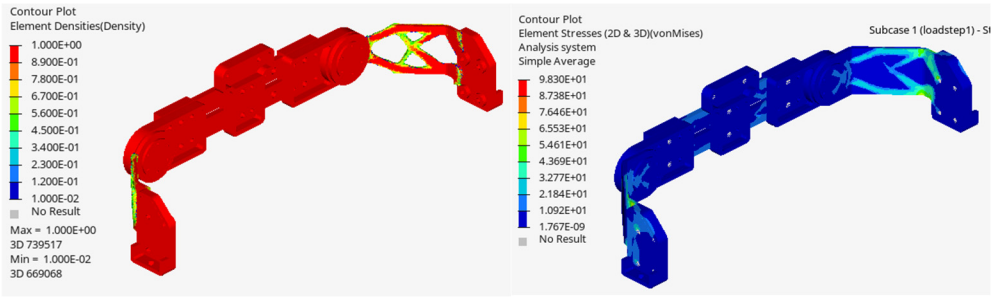


Рисунок 16-17 — Результаты оптимизации и поле напряжений узла пояса

Судя по полученным полям напряжений, напряжения не превышают предела пропорциональности $\sigma_{0,2} = 336$ МПа для сплава Д16Т, таким образом конструкция работает в упругой зоне. Максимальные значения напряжений в узлах представлены в таблице 4:

Таблица 4 — Максимальные напряжения в узлах экзоскелетного каркаса

Стопа	Голень	Бедро	Пояс
209 МПа	174 МПа	147 МПа	98 МПа

Исходя из результатов, самым нагруженным узлом экзоскелетного каркаса является стопа, что не противоречит результатам исследования работы [1].

Масса узлов экзоскелетного каркаса была значительно снижена, что отражено в таблице 5:

Таблица 5 — Максимальные деформации в узлах экзоскелетного каркаса

Узел	Стопа	Голень	Бедро	Пояс
Начальная масса, гр.	420	810	817	1380
После оптимизации, гр.	301	609	776	1210
Изменение, %	29	25	6	13

Таким образом общее снижение массы экзоскелетного каркаса составило 892 грамма, что является 8% от общего веса экзоскелетного каркаса.

Далее, воспользовавшись кривой усталости (рис. 5) было рассчитано количество циклов нагружения для каждого узла каркаса (табл. 6):

Таблица 6 — Количество циклов нагружения до разрушения

Стопа	Голень	Бедро	Пояс
$1 \cdot 10^4 - 2 \cdot 10^4$	$3 - 5 \cdot 10^4$	10^5	10^7

Можно сделать вывод, что самым слабым звеном экзоскелетного каркаса является стопа. Она подвержена наибольшим циклическим нагрузкам, что негативно сказывается на количестве циклов работы. Поэтому

требуется смена материала, в сторону более выносливых к циклическим нагрузкам образцов. Напротив, самым выносливым узлом экзоскелетного каркаса является пояс.

Заключение

Полученные результаты говорят о том, что впредь нельзя проводить прочностной расчет для экзоскелетных каркасов, основываясь только на статической постановке, когда напряжения не должны превышать предела пропорциональности или текучести. Теперь необходимо учитывать предел усталости, который напрямую определяет ресурс экзоскелетного каркаса. Полученный результат для узлов стопы и пояса как раз-таки подтверждает, что некоторые из узлов имеют на порядок меньший ресурс в сравнения с остальными, хотя максимальные напряжения не достигают пределе пропорциональности. Поэтому желательно увеличить ресурс наиболее нагруженных частей каркаса путем подбора более устойчивого к циклическому нагружению материала (сталь или титан).

Литература

1. CMU Graphics Lab Motion Capture Database [Электронный ресурс] // mocap.cs.cmu.edu.
2. Шанявский А.А., Никитин А. Д., Thierry Palin-Luck/ Сверхмногоцикловая усталость алюминиевого сплава Д16Т // Физ. мезомех.. 2020. №3.
3. M.P.Bendsoe, O. Sigmund/ Topology optimization. Theory, methods and applications/ Berlin, 2003г. 391 с.

Информация об авторе

Барынкин Иван Сергеевич, инженер, Государственный научный центр Российской Федерации «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики» (ГНЦ РФ ЦНИИ РТК), Россия, 194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 21, ivan.barynkin08@gmail.com

Экзоскелет для производственных и складских работ

Г.В. Савинков✉, А.С. Попов
Санкт-Петербургский Государственный Морской Технический Университет (СПБГМТУ), Санкт-Петербург, Россия, glebsavinkov@gmail.com

Аннотация
В условиях промышленного производства рабочие вынуждены демонстрировать высокую подвижность, требующую значительных физических усилий, гибкости и манёвренности, перед рабочими стоит множество задач с применением ручного труда, включающего в себя тяжёлое оборудование. Соответственно перед создателями экзоскелетов, что уже достаточно давно применяются в разных промышленных сферах, активно встаёт вопрос о решении проблем связанных с разным характером нагрузок на человека при работе, а именно вопросы обеспечения безопасности перемещения и работ в экзоскелете, реализация автоматизации основных и повторяющихся действий оператора при работе, а также регулировка скорости выполнения рабочих задач. В данной работе был разработан прототип активного прилегающего экзоскелета, что представляет собой руку с малым количеством степеней свобод, для выполнения примитивных действий.

Ключевые слова
Экзоскелет, биомеханика, прилегающий экзоскелет, обеспечение безопасности.

Благодарности
Исследования выполнены при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках реализации программы «Приоритет 2030».

Exoskeleton for production and warehouse work

Gleb V. Savinkov✉, Anton S. Popov
Saint-Petersburg State Marime Technical University (SMTU), St. Petersburg, Russia, glebsavinkov@gmail.com

Abstract
In industrial production settings, workers are forced to demonstrate high mobility, which requires significant physical effort, flexibility, and maneuverability. They face numerous tasks involving manual labor that includes heavy equipment. Consequently, developers of exoskeletons, which have long been used in various industrial sectors, are increasingly addressing issues related to the different types of physical demands placed on workers. These issues include ensuring safe movement and operation in the exoskeleton, implementing automation of core and repetitive actions during work, and adjusting the speed of task execution. This work presents a prototype of an active close-fitting exoskeleton, designed as an arm with a limited number of degrees of freedom, intended for performing basic actions.

Key words
Exoskeleton, biomechanics, adjacent exoskeleton, safety.

Acknowledgements
Ministry of Education and Science of Russia within the framework of the strategic academic leadership program «Priority-2030».

Введение

Экзоскелет — устройство, предназначенное для увеличения силы мышц человека и расширения амплитуды движений за счёт внешнего каркаса и приводящих частей, а также для передачи нагрузки при переносе груза через внешний каркас в опорную площадку стопы экзоскелета. Экзоскелет повторяет биомеханику человека для пропорционального увеличения усилий при движениях, как кибернетическое устройство он является весьма сложным механизмом. Как и для любой технической системы, при создании функциональной модели необходимы знания о принципах действия, функционально физических связях и причинно-следственных отношениях между разнородными по физической и бионической реализации возможностями. Такие трудности необходимы для достижение оптимальной синхронизации между оператором и системой, чтобы предотвратить задержки при интенсивной работе, такой как: погрузка и разгрузка грузов, физические нагрузки при изготовлении, монтажные и демонтажные работы и т.д. Отсюда следует необходимость в изучении основных движений области верхних конечностей.

Анализ биометрики верхних конечностей

Плечевой сустав, или проксимальный сустав верхней конечности, – самый мобильный из всех суставов человеческого тела, он играет ключевую роль при любом физическом труде. Если мы говорим о травмах на предприятии, то самые частые случаи вывихов и растяжений приходятся именно на плечевой сустав. Он обладает тремя степенями свободы, что позволяет верхней конечности совершать движения в трех плоскостях в пространстве и по отношению к трем основным осям (см. Рис. 1). Данный сустав в строении экзоскелетов изучают крайне тщательно, ибо из-за своих особенностей он становится основной точкой опоры дальнейшей системы, давления с которой уже переходят на спину оператора.

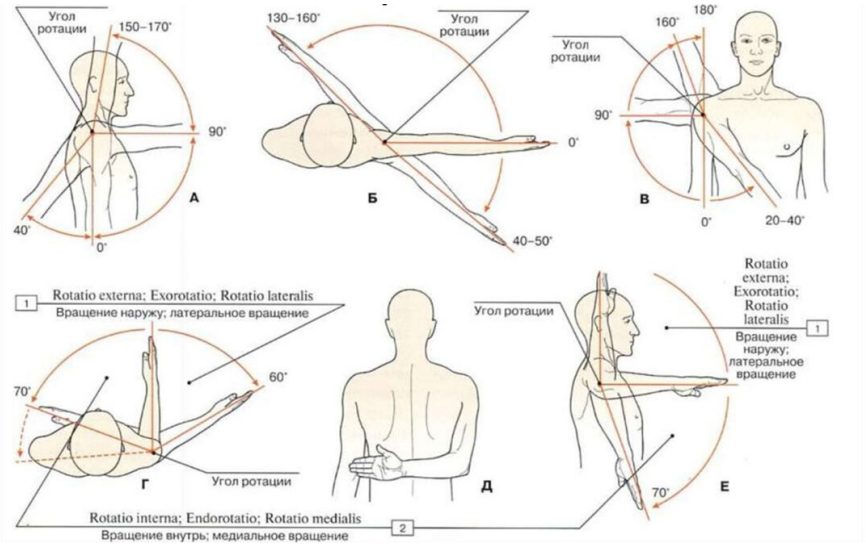


Рисунок 1 — Основные движения в плечевом суставе

Далее для более правильного расположения дальнейших осей вращения в системе, следует изучить движения сгибания и разгибания, а также общий вид вращения [1]. Вращение сочетает обычные движения вокруг трех основных осей (см. рис. 2). Когда вращение осуществляется в максимальной амплитуде, рука описывает в пространстве конус – конус вращательного движения. Вершина этого конуса находится внутри сферы, центр которой расположен в плечевом суставе, а ребро равно длине верхней конечности. Однако его основание далеко от обычного конуса и является деформированным за счет наличия туловища. Этот конус представляет собой сферический сектор доступных движений, внутри которого кисть может взять предмет и поднести его ко рту без изменения положения туловища. На рисунке 2 красным отображается основание конуса вращения (путь, описываемый кончиками пальцев), пересекая различные сектора пространства, определяемые исходными взаимно перпендикулярными плоскостями движений в плечевом суставе: Сагиттальная плоскость А, или скорее парасагиттальная, поскольку настоящая сагиттальная плоскость проходит через продольную ось туловища (это плоскость сгибания-разгибания). Фронтальная, или коронарная, плоскость В, параллельная плоскости опоры спины (это плоскость приведения-отведения). Поперечная плоскость С, перпендикулярная оси туловища (это плоскость горизонтального сгибания-разгибания), т.е. остающаяся в горизонтальной плоскости.

В соответствии с полученными данным для действий, связанных с поднятием и удержанием конструкций и объектов для этого хватит трёх точек вращения, соответствующих сгибательным движениям человеческой руки. Если наша конструкция будет направленна на уменьшение сил, затраченных на непосредственное действие и удержание руки в одном состоянии, то сложной формой, что будет повторять руку человека, можно пренебречь и использовать простую крепкую структуру с кронштейном для работы в локтевом суставе. Исходя из полученной анатомической информации, мы устанавливаем «красную зону» – нерабочую зону, в момент попадания рабочего органа в которую будут отключаться наши электродвигатели и «зелёную зону» - зону, в которой рабочий орган манипулятора может спокойно передвигаться и достигать всех возможных координат. При определении таких зон важно также понимать, что математическое представление системы машиной касается лишь точек поворота и краев звеньев и не учитывает ширину конструкции. Учитывая ширину звеньев, максимальную развёртываемость системы и положение начала манипулятора, относительно человека мы устанавливаем данные зоны (см. рис. 3). Расположение данных зон совпадает с полученной информацией о сгибательных способностях человеческой руки (см. таб. 1).

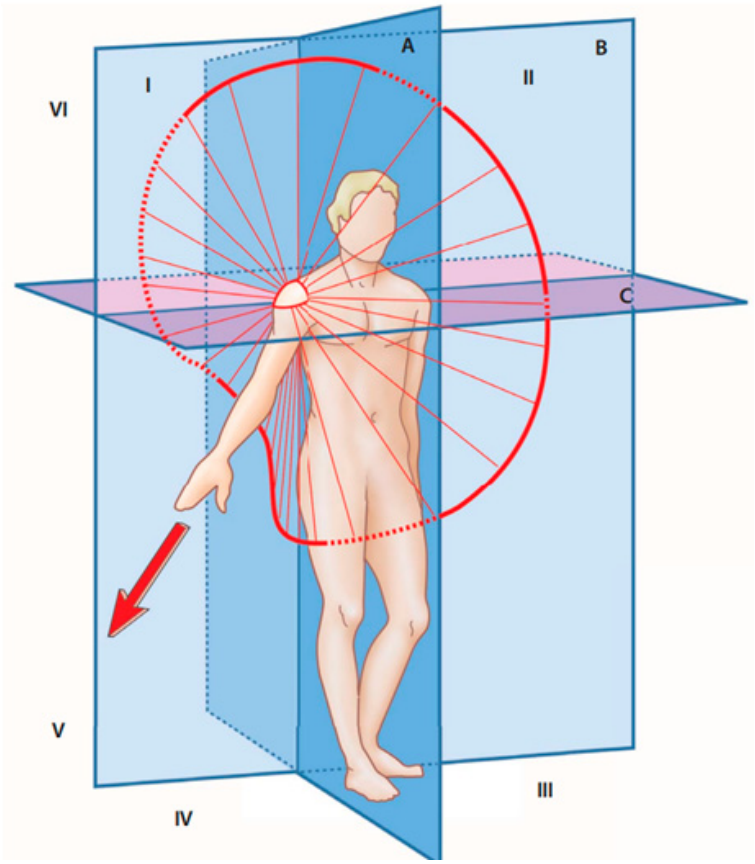


Рисунок 2 — Основные движения в плечевом суставе

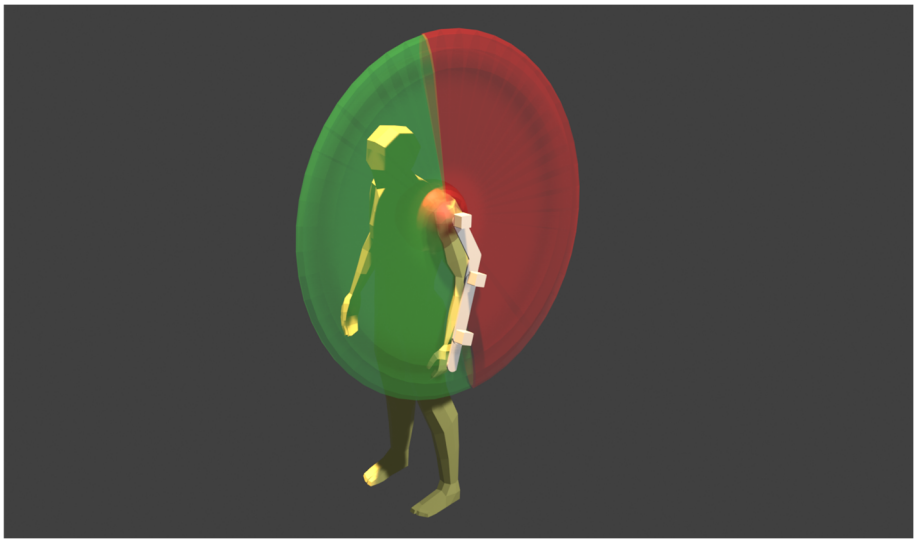


Рисунок 3 — Возможности движения системы

Таблица 1 — Оценка амплитуды движений в суставах (в угловых градусах)

Сустав	Движение (до предельно возможного угла)	Норма
Плечевой с плечевым поясом	Сгибание Разгибание Отведение	180-121 >30 180-116
Локтевой	Сгибание Разгибание Пронация	30-79 180-149 180-136
Лучезапястный (кистевой)	Сгибание Разгибание Отведение	80-36 95-31 30-11

Создание прототипа в соответсвии с полученными данными

В результате анализа был разработан прототип руки активного прилегающего экзоскелета. Для поднятия и удержания каких-либо объектов, инструментов, конструкций и т.д., особая гибкость не нужна, но крайне важны основные сгибательные движения руки, в таком случае было решено установить крепление конструкции на лопатки оператора для распределения массы. Так же, в связи с характером работы нам неизвестны габариты и вес поднимаемого груза из чего следует, что нам неизвестны и необходимые усилия, и в каких границах допустимого находится вес самой системы, поэтому конструкция была облегчена при помощи использования полиметилметакрилата (ПММА), а электроприводами стали шаговые электродвигатели. Для того, чтобы система была более оптимальной и соответствовала скорости человека оператора мы ориентируемся на регулировку скорости выполнения движений и малые обороты. Для реализации расчёта положения наших двигателей мы прибегли к программному методу не включающим в себя сложные алгоритмы фильтрации и множество датчиков, т.к. в примерах реализации системы управления электроприводами экзоскелета на данный момент чаще всего встречается проблемы перегруженности системы из-за чего падает скорость работы и соответственно её синхронизация с носителем. Программа высчитывает количество пройденных шагов и сравнивает с допустимыми и при срабатывании, либо отключает систему, либо даёт возмущение для того, чтобы оператор обратил внимание на ошибку и перестал посылать сигнал движения в направление недоступной области и тем самым не навредил себе. В нашем случае угол поворота сравнивается с максимально допустимым углом поворота сустава человека в обе стороны. В связи с тем, что, человеку необходимо в нерабочем состоянии спокойно и свободно двигаться, не ощущая противодействие двигателей, также были разработаны два режима ношения, режим удержания объектов и активного пользования, а также режим пассивного ношения.

В основе управления стоит человек оператор, что в режиме реального времени управляет движениями экзоскелета, управляющее воздействие будет исходит из средств передачи информации в виде джойстика и потенциометра на микроконтроллер, где уже будет обрабатывается и возвращается на исполнительные устройства серией сигналов, в зависимости от характера управляющего воздействия. Далее происходит аппаратная регулировка поступающий сигналов, опционально к каждому по отдельности, в связи с характером скорости поворота разных осей вращения руки человека при движении. Двигатели, получив ряд сигналов приводят в движение систему вместе с рукой человека и объектом манипуляций.

Испытания

Испытания проводились для определения следующих фактических характеристик: скорость отклика, время блокировки движения перед переводом системы в режим пассивного ношения, время действия пассивного режима перед восстановлением работоспособности, время полного оборота системы (см. таб. 2). Все тесты проводились в бытовых условиях (см. рис. 4) с применением небольших грузов и симуляцией рабочих задач, таких как: наклон с подъёмом объекта, удержание и работа с инструментом, а также смена темпа работы.

Таблица 2 —Результаты испытаний (t, c)

Наименование измерения	t, c
Скорость отклика	0,23
Время блокировки движения перед переводом системы в режим пассивного ношения	8,12
Время действия пассивного режима перед восстановлением работоспособности	4,37
Время полного оборота системы	11,59

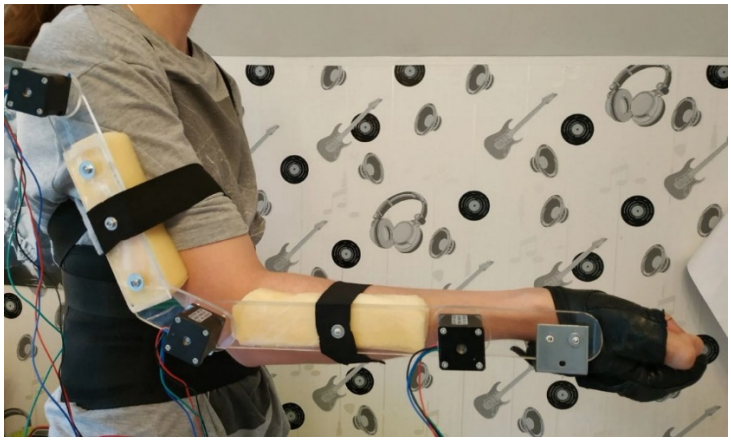


Рисунок 4 — Экзоскелет на операторе

Заключение

В результате испытаний прототип экзоскелета оправдал ожидания, скорость отклика значительно выше, чем у известных примеров с сложной системой мониторинга движений человека [2,3], вложенные функции показали себя штатно, система безопасности и определения доступных траекторий движения хоть и замедляет работу, но не смотря на свою простоту, чётко определяет пределы и не позволяет оператору навредить себе.

В дальнейшем экзоскелет имеет потенциал для совершенствования и развития, например, стоит вопрос о применении неприлегающей структуры или введения модульной системы звеньев для оптимизации руки для разных носителей. Также в будущем планируется развить пул выполняемых автоматически задач до уровня промышленного манипулятора малых габаритов. Дальнейшее направление в управлении системой сместится на применение методов считывания ЭМГ сигналов с соответствующей оптимизацией под нужды работников.

Литература

1. Капанджи, А.И. Верхняя конечность. Физиология суставов: схемы биомеханики человека с комментариями / А. И. Капанджи; предисловие профессора Рауля Тубьяна. — Москва : Эксмо, 2020. 376 с.

2. Shared Control of a Powered Exoskeleton and Functional Electrical Stimulation Using Iterative Learning: [Электронный ресурс] // Frontiers in Robotics and AI. Режим доступа: URL: https://www.researchgate.net/publication/355886643_Shared_Control_of_a_Powered_Exoskeleton_and_Functional_Electrical_Stimulation_Using_Iterative_Learning (дата обращения 10.09.24).

3. Экзоскелет для рук с контролем внимания для восстановления разгибания пальцев с использованием комбинированного жестко-мягкого механизма: [Электронный ресурс] // Frontiers in Robotics and AI. Режим доступа:URL:https://www.frontiersin.org/journals/neurorobotics/articles/10.3389/fnbot.2019.00034/full (дата обращения 13.09.24).

Информация об авторах

Савинков Глеб Владимирович, студент, Санкт-Петербургский Государственный Морской Технический Университет (СПБГМТУ), Россия, 190121, Санкт-Петербург, Лоцманская ул., д. 3, glebsavinkov@gmail.com

Попов Антон Сергеевич, ассистент кафедры киберфизических систем, СПБГМТУ, Россия, 190121, Санкт-Петербург, Лоцманская ул., д. 3, popovas@smtu-yandex.ru, ORCID: 0009-0004-1715-533X

Разработка оптической системы с вынесенным входным зрачком для высокотемпературной камеры технического зрения

Т.Н. Шемигон, А.И. Михайловский, Б.Н. Добряков
Акционерное общество «Научно-исследовательский институт телевидения» (АО «НИИ телевидения»), Санкт-Петербург, Россия, t.shemigon@niitv.ru, a.mihailovsky@niitv.ru

Аннотация
Представлены результаты разработки оптической системы объектива с вынесенным входным зрачком для высокотемпературной камеры технического зрения, предназначенной для непрерывной работы визуального мониторинга из доменной печи при экстремальных температурах, доходящих до плюс 1800°С. Проанализированы особенности оптической системы. Представлены характеристики оптической системы объектива и результаты разработки. Рассмотрено применение оптической системы в промышленной области.

Ключевые слова
Оптическая система, объектив, вынесенный входной зрачок, жаростойкая телевизионная система.

Development of an optical system with a remote entrance pupil for a high-temperature machine vision camera

Tatyana N. Shemigon, Arthur I. Mihailovsky, Boris N. Dobryakov
Joint-Stock Company «Research Institute of Television» (JSC «Research Institute of Television»), St. Petersburg, Russia, t.shemigon@niitv.ru, a.mihailovsky@niitv.ru

Abstract
The results of developing an optical system of a lens with a remote entrance pupil for a high-temperature machine vision camera intended for continuous operation of visual monitoring from a blast furnace at extreme temperatures reaching plus 1800°C are presented. The features of the optical system are analyzed. The characteristics of the optical system of the lens and the results of development are presented. The application of the optical system in the industrial field is considered.

Key words
Optical system, lens, distant entrance pupil, heat resistant television system.

Введение

В последние десятилетия наблюдается тенденция высоких темпов развития разработок термостойкой аппаратуры и появление большого числа усовершенствованных моделей.

К данному типу аппаратуры, в частности, относятся термостойкие системы телевизионного наблюдения, также именуемые, как жаростойкие телевизионные системы (далее – ЖТС). Оснащение ЖТС оптико–телевизионными модулями позволяет вести трансляцию за высокотемпературными объектами, проводить осмотр внутренних поверхностей стен печи сквозь пламя с моментальной индикацией горячих участков и высокоточного измерения температуры по каждой точке в режиме реального времени. В состав оптико–телевизионного модуля входят специализированные оптические системы с вынесенным входным зрачком (далее – объективы), предназначенные для изображения объектов на матричном фотоприемном устройстве (далее – МФПУ) ЖТС.

Так как ряд характеристик ЖТС напрямую обусловлен работой объектива, то разработка новых решений в оптическом приборостроении остается актуальной задачей.

При разработке объектива были использованы компьютерные методы расчета и проектирования оптических систем. Существуют объективы с вынесенным входным зрачком различных конструкций, при этом различающихся между собой значениями полей зрения, относительного отверстия, удалением входного зрачка, а также наличием промежуточного изображения, что позволяет получать прямое изображение объекта [1].

Расчет оптических систем с вынесенным зрачком считается длительной и трудоемкой работой, связанной с необходимостью обеспечить значительный вынос зрачка и при этом обеспечить необходимые габариты и характеристики всей системы. Достижение высокого качества изображения и коррекция аберраций также имеет в этом случае свою специфику [2].

Целью работы является разработка оптической системы объектива, структурный анализ и обоснованный выбор схемного решения, реализованного для высокотемпературной камеры технического зрения, производство которой обеспечит конкурентные преимущества производителю.

В данной работе представлена оптическая система объектива, рассмотрены особенности, принцип работы оптической системы и практическое применение.

Структура и основные характеристики оптической схемы объектива

Начальный этап синтеза служит задачей оптимального схемотехнического проектирования нового изделия. Расчет объектива заключается в определении конструктивных параметров системы исходя из поставленных техническим заданием требований к качеству оптического изображения. Оптические компоненты объектива могут состоять из нескольких линз с различными коррекционными свойствами.

Параметры и схема построения разработанного объектива выбираются исходя из требований назначения, габаритных ограничений и типа применяемого МФПУ.

Оптическая схема объектива с ходом лучей представлена на рисунке 1.

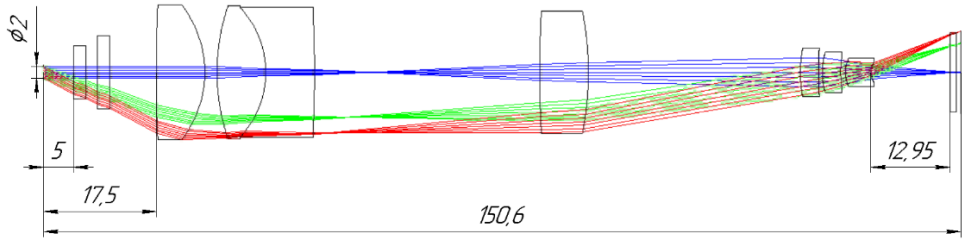


Рисунок 1 — Оптическая схема объектива с ходом лучей

Оптическая система объектива обеспечивает наблюдение нагретых объектов, излучающих в ближней ИК области спектра [3]. Излучение нагретых тел в ближнем инфракрасном диапазоне характеризуется непрерывным распределением по спектру длин волн с максимумом, положение которого зависит от температуры источника [4]. Рабочий спектральный диапазон работы объектива лежит в диапазоне от 0,85 до 1,05 мкм, что относится к ближнему инфракрасному диапазону. Применение интерференционного фильтра позволяет выполнять работы только в указанном выше диапазоне, что предотвращает попадание паразитного излучения – излучения, лежащего вне данного диапазона, вызывающего сторонние нежелательные эффекты.

Объектив с вынесенным входным зрачком для ближней ИК области спектра содержит три основные линзовые группы. Первая линзовая группа состоит из двух компонентов и формирует промежуточное изображение, которое далее с уменьшением масштаба проецируется в плоскость МФПУ посредством одиночного второго компонента и третьего компонента, состоящего из группы одиночных линз. Поскольку работа объектива ведется в не очень широком спектральном диапазоне, то для коррекции остаточных хроматических аберраций достаточно было выполнить один из компонентов в виде склейки из двух линз, состоящих из разных марок стекол [5]. Плоскопараллельная пластина, установленная в плоскости изображения, учтена при аберрационной коррекции, поскольку располагается в сходящемся пучке падающих на матрицу лучей. Пластина является элементом МФПУ и обеспечивает его функционирование. Вынесенный зрачок объектива также является его апертурной диафрагмой и определяет количество светового потока, входящего в объектив.

Входной зрачок оптической системы диаметром 2 мм находится от первой поверхности линзы объектива на расстоянии 17,5 мм, а от защитного стекла на расстоянии 5 мм. Применение положительных линз после защитного стекла и интерференционного фильтра позволило обеспечить максимальный световой диаметр равный 22 мм. В объективе отсутствует виньетирование полевых пучков, что позволяет создавать изображение объектов с равномерной освещенностью в плоскости МФПУ [6]. Дисторсия объектива составляет величину менее 1%, что позволяет наблюдать объекты с минимальными геометрическими искажениями.

Основные характеристики разработанного объектива с вынесенным входным зрачком представлены в таблице 1.

Таблица 1 — Основные характеристики разработанного объектива с вынесенным входным зрачком

Характеристика	Обозначение	Значение
Фокусное расстояние, мм	f′	–13,00
Относительное отверстие	D/f′	1:6,4
Угловое поле зрения (по диагонали) в пространстве предметов, град.	2ω	55°
Дисторсия, %, не более	DIS	-0,4
Рабочий спектральный диапазон, мкм	Δλ	0,85 – 1,05
Диаметр входного зрачка, мм	D	2,00
Максимальный вынос входного зрачка перед системой, мм	Sp_{MAX}	17,5
Общая длина оптической системы, мм	$L_{общ}$	150,6
Рабочий диапазон температур, °C	ΔT	от 5 до 50

Частотно-контрастная характеристика (ЧКХ) объектива представлена на рисунке 2.

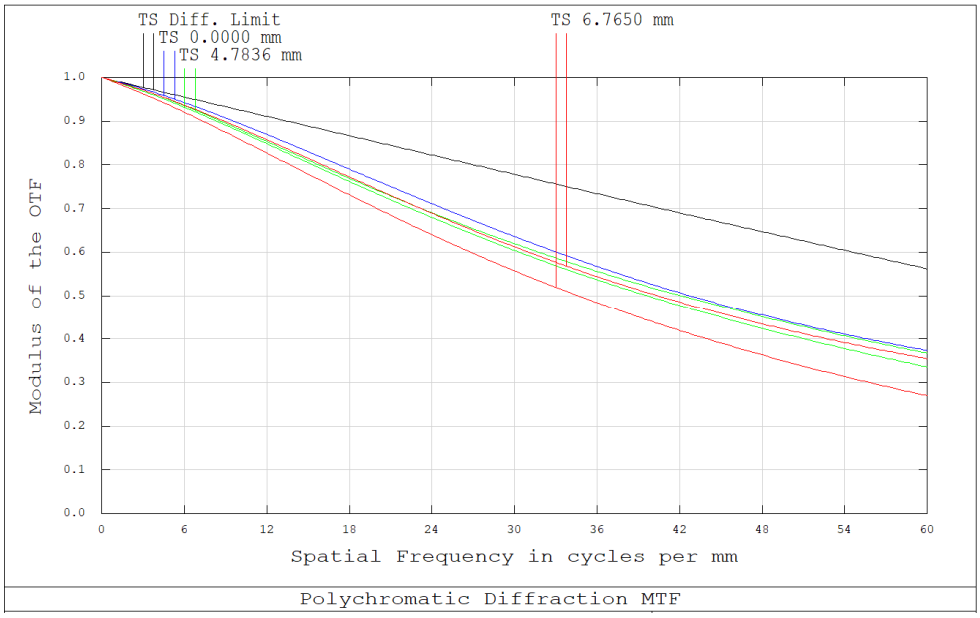
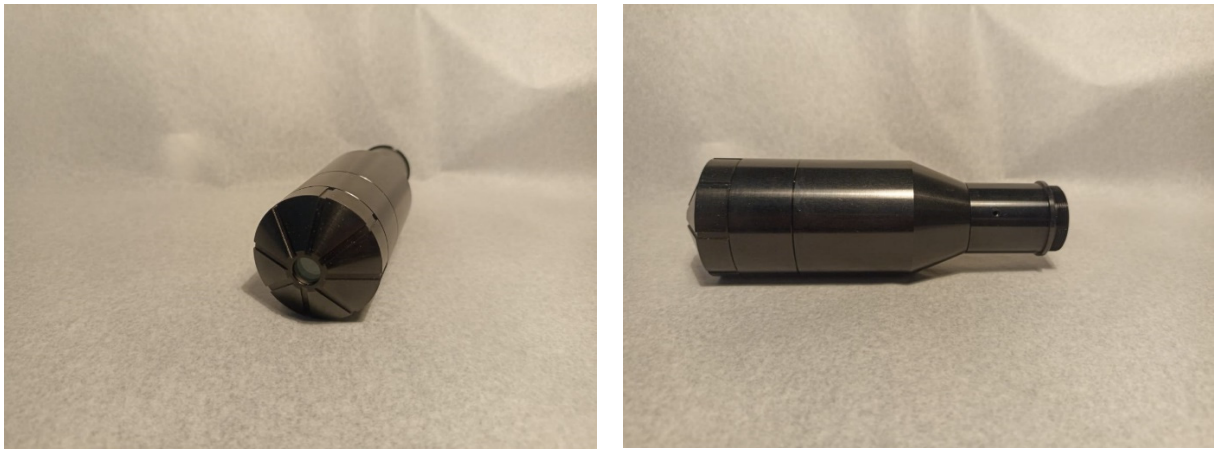


Рисунок 2 — График частотно–контрастной характеристики объектива при T = 20°C

Таким образом, разработанный объектив с представленными выше характеристиками позволяет при максимально возможном удалении входного зрачка с сохранением поперечных размеров объектива обеспечить минимальную дисторсию и сохранить высокое качество оптического изображения, а также повысить технологичность за счет уменьшения количества марок бесцветного оптического стекла [7]. Аналоги разработанного объектива отсутствуют на Российском рынке.

Практическое применение оптической системы объектива с вынесенным входным зрачком

В АО «НИИ телевидения» были разработаны и изготовлены опытный образец объектива и ЖТС, представленные на рисунках 3 и 4, соответственно.



а) **б)**

Рисунок 3 — Опытный образец объектива: а) вид спереди; б) вид сбоку

Представленная на рисунке 4 ЖТС позволяет снимать в режиме онлайн и наблюдать за расплавом металлов, стекольной шихтой, керамическими сплавами, а также контролировать состояние печей, что позволяет отследить будущие поломки. По мнению экспертов в печах пиролиза нефтеперерабатывающих заводов остановка работ на один час может приводить к убытку до одного миллиона рублей, поскольку печи работают круглогодично и прерывание работ экономически нецелесообразно. Ввиду чего есть необходимость проводить постоянные регламентные проверки состояния печи без необходимости присутствия человека. ЖТС позволяет проводить наблюдение и контроль без отключения печи.

Конструктивное исполнение ЖТС позволяет обеспечить прочность и устойчивость камеры к тепловым воздействиям, вызванные высокой температурой эксплуатации.

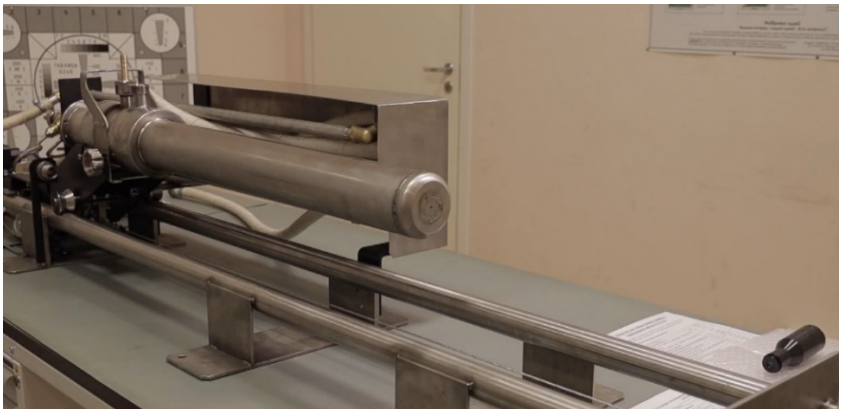


Рисунок 4 — Жаростойкая телевизионная система (ЖТС), разработанная и изготовленная в АО «НИИ телевидения»

При достижении температур порядка 1000 °С наиболее устойчивым к изменению формы является кварцевое стекло [8]. Изменение формы приводит к искажениям передачи информации об объектах, что в свою очередь нарушает функционирование ЖТС в требуемых условиях эксплуатации. Объектив, который находится внутри ЖТС, позволяет снимать, транслировать изображение в реальном времени, но отдельно от камеры не обладает жаростойкостью. Он работает при температурах до плюс 50°С.

В ЖТС предусмотрена непрерывная подача по системе труб холодной воды и воздуха из отдельного резервуара, в результате чего температура непосредственно вокруг объектива и электронных компонентов поддерживается стабильной. Внутри камеры постоянно поддерживается избыточное давление воздуха, что позволяет защитить объектив от попадания на него прямого пламени и продуктов горения.

Функциональные характеристики ЖТС:

– непрерывный визуальный мониторинг с функциями измерения высокотемпературных поверхностей и диагностикой состояния механизмов и узлов технологического оборудования при условиях эксплуатации до плюс 1800 ºС;

– построение температурных карт в печах, реализованный на отечественной операционной системе Astra Linux обеспечивающий выявление раннего износа стен;

– бесконтактный контроль состояния оборудования позволяет не подвергать опасности технический персонал и не вредить окружающей среде (нагрев, охлаждение, контакт с продуктами горения, влагой);

– работа в автоматическом режиме позволяет снизить нагрузочные работы с оператора.

Конкурентные преимущества ЖТС:

– визуальное наблюдение внутренних поверхностей стен печи сквозь пламя с моментальной индикацией горячих участков;

– высокоточное измерение температуры по каждой точке с введением видеоархива;

– вывод тепловизионного изображения на экран в режиме реального времени;

– собственный жаропрочный кожух, обеспечивающий работу изделия при температуре до плюс 1800°С с системой охлаждения и приспособлением для обдува смотрового окна сжатым воздухом.

Проведены испытания в горно-металлургической компании, например, на рисунке 5 показано тестирование, которое прошло в сталеплавильных печах при температуре плюс 900°С. Официальный запас прочности до температуры плюс 1800°С. Пример измерения температуры внутри печи показан на рисунке 6.

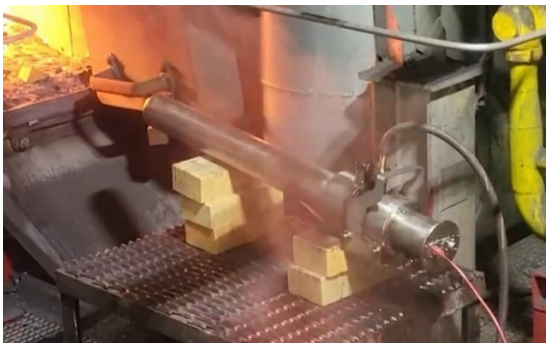


Рисунок 5 — Тестирование ЖТС в сталеплавильных печах при температуре до плюс 900°С

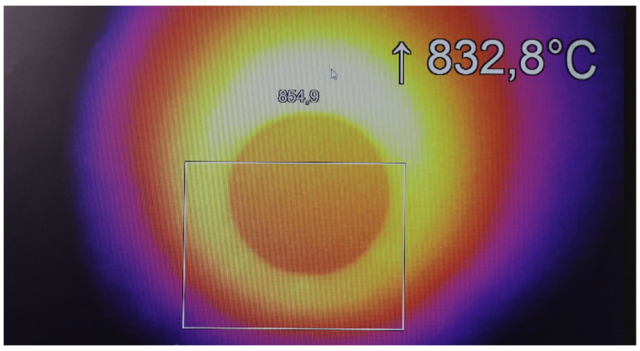


Рисунок 6 — Измерения температуры выведенные на экран

Испытания ЖТС полностью подтвердили заложенные в техническом задании и предъявляемые заказчиками требования к изделию. Помимо металлургии, данная оптическая система может использоваться на

химических и стекольных производствах для контроля за качеством плавки, в сфере ЖКХ можно следить за состоянием отопительных котлов.

Объектив с вынесенным входным зрачком для высокотемпературной камеры технического зрения может также использоваться на промышленных объектах и объектах ядерной энергетики с целью повышения безопасности и эффективности.

Литература

1. Слюсарев Г.Г. Расчет оптических систем – Л. : «Машиностроение», 1995. – 640 с.
2. Васильев В.Н., Смирнов С.А, Бахолдин А.В, Гримм В.А, Романова Г.Э, Гришина Н.Ю. Расчет объективов с вынесенным зрачком. – Сборник трудов Международной конференции «Фундаментальные проблемы оптики – 2012». Санкт-Петербург. 15-19 октября 2012 / Под ред. проф. В.Г. Беспалова, проф. С.А. Козлова.– СПб: НИУИТМО, 2012. – 4 с.
3. Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г. Инфракрасные системы «смотрящего» типа – М. : Логос, 2004. – 443 с.
4. Михеев С.В. Основы инфракрасной техники. – СПб: Университет ИТМО, 2017. – 127 с.
5. ГОСТ 3514–94. Стекло оптическое бесцветное. Технические условия.
6. Русинов М.М. Композиция оптических систем. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1989. – 383 с.: ил.
7. Патент N 2820282 Российская Федерация, МПК G02B 15/16 (2006.01). Объектив с вынесенным входным зрачком для ближней ИК области спектра (варианты) : N 2023133932 : заявл. 14.12.2023 : опубликовано 03.06.2024 / Шемигон Т. Н., Михайловский А. И., Добряков Б. Н., Зимин В.А. ; заявитель АО «НИИ телевидения». – 11 с. : ил. – Текст : непосредственный.
8. ГОСТ 15130–86. Стекло кварцевое оптическое. Общие технические условия.

Информация об авторах

Шемигон Татьяна Николаевна, инженер-конструктор, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт телевидения» (АО «НИИ телевидения»), Россия, 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 22, t.shemigon@niitv.ru

Михайловский Артур Игоревич, начальник бюро, АО «НИИ телевидения», Россия, 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 22, a.mihailovsky@niitv.ru

Добряков Борис Николаевич, ведущий инженер, АО «НИИ телевидения», Россия, 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 22, b.dobryakov@niitv.ru

Проблемы разработки интеллектуальных систем управления двигателями переменного тока

А.К. Голубев, В.М. Фомин✉, А.К. Иванов
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО» (Университет ИТМО), Санкт-Петербург, Россия, vmfomin@itmo.ru

Аннотация
В работе рассматривается задача интеллектуального управления двигателями переменного тока. Освещается высокий показатель актуальности рассматриваемой проблемы. По результатам проведения натурных экспериментов и работ по созданию стенда для интеллектуального управления асинхронными двигателями представляются методические рекомендации по разработке таких систем.

Ключевые слова
Асинхронный двигатель, интеллектуальное управление, стенд.

Problem of intelligent AC motor control systems engineering development

Anton K. Golubev, Valentin M. Fomin✉, Alexander K. Ivanov
Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education National Research ITMO University (ITMO University), St. Petersburg, Russia, vmfomin@itmo.ru

Abstract
This paper considers the problem of intelligent control of AC motors. The high index of relevance of the considered problem. According to the results of full-scale experiments and works on creation of the stand for intelligent control of asynchronous motors the methodical recommendations for the development of such systems are presented.

Key words
Induction motor, intelligent control, stand.

Современные системы векторного управления прошли долгий путь развития и в настоящее время являются наиболее распространенными среди систем электропривода переменного тока. Векторное управление позволяет добиться независимого и точного регулирования момента и скорости вращения вала двигателя, что является ключевым фактором для многих современных приложений, требующих высокой динамики и точности. В отличие от скалярного управления, которое регулирует только одну величину (частоту или напряжение), векторное управление одновременно воздействует на две независимые составляющие силы тока: продольную (связанную с моментом) и поперечную (связанную с потокосцеплением). Это позволяет достичь высокой динамики и эффективности, а также точного следования заданному закону регулирования, что делает векторное управление незаменимым инструментом в различных областях применения асинхронных двигателей [1].

Интеллектуальное управление существенно дополняет возможности векторного управления асинхронными двигателями, компенсируя его недостатки и расширяя функциональность [2]. Векторное управление, хотя и обеспечивает высокую точность и динамику, основано на точной математической модели двигателя, которая в реальности может быть несовершенной из-за изменений параметров двигателя (сопротивление обмоток, индуктивность), либо же недостаточно точно отражать все процессы, происходящие при работе двигателя. Здесь на помощь приходят интеллектуальные методы управления, которые обеспечивают адаптацию и повышение робастности системы управления. Интеллектуальные алгоритмы могут в режиме реального времени адаптировать параметры модели асинхронного двигателя к текущим условиям работы. Это позволяет компенсировать расхождения между математической моделью и реальным поведением двигателя, повышая точность управления даже при изменении параметров [3].

Результатом этой работы являются методические рекомендации по разработке интеллектуальных систем управления двигателями переменного тока, сформулированные и полученные как следствие создания стенда для отработки различных сценариев работы промышленного асинхронного двигателя.

Динамическую модель асинхронного двигателя, в неподвижной, относительно статора, системе координат, характеризуют следующие уравнения [4]:

$$\frac{d}{dt}\lambda = -\left(\frac{R_r}{L_r}\boldsymbol{I} - n_p\boldsymbol{J}\omega\right)\lambda + \frac{R_r L_m}{L_r} i,$$

$$\frac{d}{dt} i = -\left(\frac{R_s}{L_s\sigma} + \frac{R_r L_m^2}{\sigma L_s L_r^2}\right) i + \frac{L_m R_r}{\sigma L_s L_r}\left(\frac{R_r}{L_r}\boldsymbol{I} - n_p\boldsymbol{J}\omega\right)\lambda + \frac{1}{\sigma L_s} v,$$

$$\frac{d}{dt}\omega = \frac{1}{j}(\tau_e - \tau_L).$$

где: λ – мгновенные значения потокосцепление ротора; i – мгновенные значения силы тока статора; v – мгновенные значения напряжения питания статора; ω – скорость вращения ротора; Rr и Lr – сопротивление и индуктивность ротора, соответственно; Rs и Ls – сопротивление и индуктивность статора, соответственно; Lm – взаимоиндукция; $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}$ – коэффициент утечки индуктивности; np – количество пар полюсов; j – момент инерции приведенный к валу двигателя; τ_e – электромагнитный момент двигателя; τ_L – момент нагрузки; I – единичная матрица; $J = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$.

Как видно, модель двигателя нелинейна. Насыщение магнитной цепи, зависимость индуктивностей от силы тока и потокосцепления, а также нелинейные характеристики потерь в стали делают аналитическое решение практически невозможным. Даже численное решение может быть трудоемким и требовать значительных вычислительных ресурсов, особенно для сложных моделей, учитывающих все нелинейные эффекты.

Кроме нелинейности система обладает большим количеством параметров, определение значений которых может быть затруднено. Существуют методы их определения с использованием схемы замещения и паспортных данных [5]. Однако, такая процедура трудоемка и не всегда эффективна, поэтому, задача онлайн идентификации параметров перспективнее. Для осуществления процедуры онлайн идентификации в первую очередь необходимо привести систему к виду линейной регрессии. Эта процедура не очевидна, однако, решение этой задачи рассматривается, например, в [4]. В этом случае необходима информация о мгновенных значениях фазных сил тока статора и напряжении питания.

Кроме определения неизвестных параметров двигателя, для синтеза векторного управления, необходимо получить информацию об ориентирующем угле. Как известно, в системах векторного управления сигналы преобразуются с использованием, например, преобразований Кларк и Парка. Для их успешного преобразования нужно не только выбрать, но и определить ориентирующий угол. В качестве этого угла можно использовать угол вращения поля ротора. Его определение можно осуществить двумя способами:

1. Установить электрические датчики на статоре. Этот подход требует изменения конструкции двигателя.
2. Использование наблюдателей состояний. Для их синтеза используются измеряемые сигналы, а именно сила тока статора и напряжение питания [6].

Таким образом, подводя микроитог, становится очевидным, что для синтеза не только самого векторного управления, но и для интеллектуального управления требуется информация о мгновенных значениях электрических сигналов.

Основной идеей подхода при разработке интеллектуальной системы управления асинхронным двигателем была максимизация унификации. Другими словами, мы стремились использовать готовые решения, предоставленные на рынке. В ходе анализа было принято решение использовать преобразователь частоты компании Delta версии MS300. Такой выбор был сделан благодаря гибкой настройке, большому количеству и дискретных, и аналоговых входов/выходов, возможность реализации различных алгоритмов управления, в том числе и бездатчиковых, а также использование как с асинхронными, так и с синхронными двигателями, что полезно в перспективе.

В результате использования указанного инвертора были выделены следующие проблемы:

1. Отсутствие возможности получения информации об электрических сигналах.
2. Сложность «программирования».

Решение первой проблемы частично предлагается самим разработчиком оборудования. Используя встроенный функционал преобразователя, можно получить информацию о линейной силе тока в фазе. Однако, она получается с использованием внутренних алгоритмов оценки этого сигнала, то есть, это оценка силы тока. Таким образом, несмотря на возможность получения этих данных, использовать их на практике для наших задач не имело особого смысла. Кроме того, инвертор позволял получить информацию о линейном напряжении и напряжении на встроенном звене постоянного тока. Эта информация также не представляла практической важности для решаемой задачи.

Для решения второй обозначенной проблемы были предприняты различные варианты. Для реализации внешних алгоритмов управления существует несколько различных сценариев. Первый из них предполагает использование аналоговых входов на самом инверторе, в этом случае управление осуществляется внешним сигналом либо в пределах от 0 до 20 мА, либо от 0 до 10 В. Как в этом случае происходит генерация сигналов, отправляемых непосредственного на обмотки двигателя – непонятно. Этот вариант был отброшен из-за его малой возможности настройки. Другой же сценарий предполагает использование софта самой компании разработчика оборудования. В этом случае разработка схемы управления заключается либо в разработке исполнительной программы, написанной на паскалеподобном языке для ПЛК, либо в разработке программы с использованием елочных диаграмм для ПЛК. Ни первый, ни второй вариант не показали себя как перспективные для решаемой задачи. Таким образом, информация об электрических сигналах, получаемая с инвертора непригодна для использования при решении нашей задачи, а встроенные средства для программирования требуют больших

время- и трудозатрат. Это оправдывает использование внешних датчиков для определения силы тока и напряжения в фазах. Для этого использовались датчики ZMCT103 и ZMPT101B, внешний вид которых представлен на рисунке 1. Всего использовалось 6 датчиков электрических сигналов, 3 для силы тока и 3 для напряжения, на каждую фазу, соответственно, по паре и 1 механического сигнала, а именно, инкрементальный энкодер, для определения угла поворота вала ротора. Информация с датчиков, получалась, преобразовывалась и обрабатывалась с использованием платы на базе микроконтроллера STM32 серии F4.

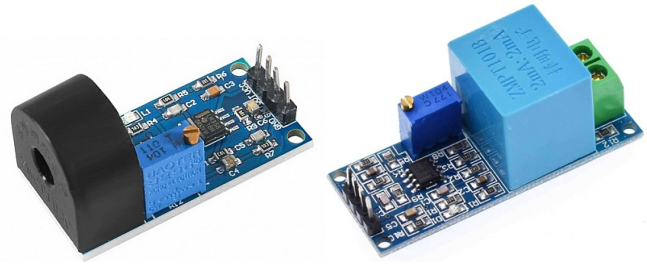


Рисунок 1 — Внешний вид датчиков силы тока и напряжения

Данные с датчиков преобразовывались с использованием встроенного аналогово-цифрового преобразователя (АЦП) настроенного для работы в режиме постоянного преобразования и разрешения 12 бит, что позволяет измерять напряжение и силу тока с большой точностью. В соответствии с первоначальной задумкой алгоритм управления предполагалось реализовывать, используя пакет MATLAB/Simulink, с предустановленными расширениями для работы с платами на базе STM32. Информация, получаемая посредством использования последовательного порта персонального компьютера (ПК) и протокола UART, преобразовывалась и использовалась для дальнейшей реализации алгоритма управления двигателем. Результаты измерения мгновенных значений силы тока статора представлены на рисунке 2.

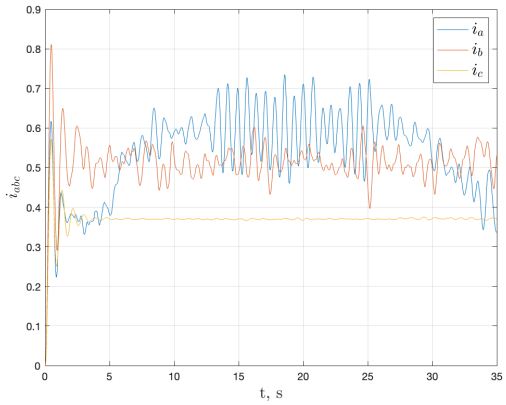


Рисунок 2 — Графики мгновенных значений силы тока статора в фазах

Как видно из представленных графиков данные непригодны для их дальнейшего использования из-за некорректности и недостоверности. В ходе анализа было выявлено, что причиной такого поведения является недостаточная частота обработки данных. Как и сами датчики не успевают уследить за быстрыми изменениями величин, так и выбранный нами протокол UART не позволяет передавать данные с высокой частотой. Вариантами решения этой проблемы являются: выбор других датчиков; выбор другого протокола передачи данных.

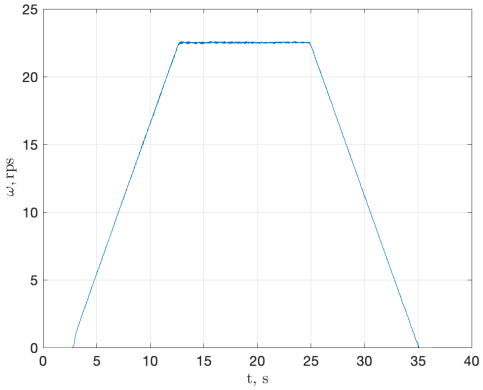


Рисунок 3 — График угловой скорости ротора

На рисунке 3 представлен график изменения угловой скорости двигателя, полученный по результатам использования пакета MATLAB. Как видно, данные, получаемые с энкодера вполне корректны, и соответствуют трапециевидному изменению скорости.

По результатам использования ПК и Simulink можно сделать вывод о трудности или невозможности использования такого подхода. Кроме необходимости синхронизации шага дискретизации модели и датчиков, время моделирования не совпадает с реальным временем. Эту проблему можно решить либо с использованием специализированного оборудования, а именно Simulink Real-Time Machine, либо полностью отказавшись от Simulink.

На данном этапе было принято решение отказаться от передачи и обработки данных в MATLAB. Прием и передача данных в дальнейшем будет осуществляться посредством использования сред разработок STM32, CubeIDE или Keil. Кроме того, несмотря на возможность реализации векторного управления с использованием готового технического решения, это не подходит для реализации собственных алгоритмов управления. Готовые инверторы хоть и поддаются программированию, всё равно обладать низким показателем гибкости к требованиям и желаниям разработчика. Самым перспективным является разработка и сборка собственного инвертора, достаточно универсального и «открытого». Следующим этапом работы будет конструкционный аналог и готовый стенд для синтеза, разработки и реализации интеллектуальных алгоритмов управления способных работать в широком спектре задач, как с сигнальной, так и с параметрической неопределённостью.

Литература

1. P. Divyasree, A. C. Binojkumar, "Vector control of voltage source inverter fed induction motor drive using space vector PWM technique," 2017 International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing (ICECDS), Chennai, India, 2017.

2. Kodkin Vladimir, Anikin Alexander on the Physical Nature of Frequency Control Problems of Induction Motor Drives // Energies 2021.

3. Горбаченко С.Л., Ковалёв Д.А., Тарабан М.В., Теппоев А.В., Войнаш С.А. Интеллектуализация электропривода. Проблемы и решения // CYBERLENINKA. - 2023. - №9. - С. 62–64.

4. Pyrkin A., Bobtsov A., Vedyakov A., Ortega R., Vediakova A., Sinetova M. A flux and speed observer for induction motors with unknown rotor resistance and load torque and no persistent excitation requirement // International Journal of Adaptive Control and Signal Processing. - 2021. - №8. - С. 1578-1593.

5. Табинский М.П. Определение параметров схемы замещения асинхронного двигателя по каталожным данным // CYBERLENINKA. - 1965. - С. 79–86.

6. Нгуен, К. Алгоритмы бездатчикового управления асинхронным двигателем с использованием адаптивных наблюдателей / К. Нгуен, А.А. Пыркин, А.К. Голубев // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. - 2024. - Т. 67. - № 7. - С. 551–558.

Информация об авторах

Голубев Антон Кириллович, аспирант, ассистент, Федеральное Государственное Автономное Образовательное Учреждение Высшего Образования «Национальный исследовательский университет ИТМО» (Университет ИТМО), Россия, 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49, лит. А, akgolubev@itmo.ru ORCID: 0009-0008-6951-2799

Фомин Валентин Михайлович, студент, Университет ИТМО, Россия, 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49, лит. А, vmfomin@itmo.ru, ORCID: 0009-0008-3774-5627

Иванов Александр Константинович, студент, Университет ИТМО, Россия, 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49, лит. А, alexivanov@niuitmo.ru, ORCID: 0009-0000-7711-0003

К вопросу о логике анализаторов цепочек поставок для предприятия лесопромышленного комплекса

А.А. Еленская[1]✉, С.С. Колмогорова[2], А.Л. Стариченков[2]
[1]*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С. М. Кирова» (СПбГЛТУ им. С. М. Кирова), Санкт-Петербург, Россия, elenskayaaa1996@gmail.com*
[2]*Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)» (СПбГЭТУ «ЛЭТИ»), Санкт-Петербург, Россия*

Аннотация
Технологии искусственного интеллекта широко распространены и используются повсеместно. Они оказывают неоценимую помощь, автоматизируя рутинные процессы на производстве. Сегодня предприятия лесопромышленного комплекса стремятся внедрить в свою деятельность современные и высокоинтеллектуальные подходы к анализу и обработке больших объемов информации. При организации цепочки поставок особое внимание следует уделять множеству факторов, их своевременное выявление и оценка позволит минимизировать затраты и повысить эффективность работы. В статье рассмотрены методы оценки эффективности цепочек поставок, типы машинного обучения, логика построения анализатора цепочки поставок.

Ключевые слова
Анализатор, логистика, цепь поставок, эффективность, машинное обучение.

On the logic of supply network analyzers for the forestry enterprise

Anna A. Elenskaya[1]✉, Svetlana S. Kolmogorova[2], Alexey L. Starichenkov[2]
[1]*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «St. Petersburg State Forestry University named S. M. Kirov» (SPbFU named S. M. Kirov), St. Petersburg, Russia, elenskayaaa1996@gmail.com*
[2]*Saint Petersburg State Electrotechnical University «LETI» named after V.I. Ulyanov (Lenin), St. Petersburg, Russia*

Abstract
Artificial intelligence technologies are widespread and used everywhere. They provide invaluable assistance by automating routine processes in production. Today, forest industry enterprises strive to implement modern and highly intelligent approaches to analyzing and processing large volumes of information in their activities. When organizing a supply chain, special attention should be paid to many factors, their timely identification and assessment will minimize costs and increase efficiency. The article discusses methods for assessing the effectiveness of supply chains, types of machine learning, and the logic of building a supply chain analyzer.

Key words
Analyzer, logistics, supply chain, efficiency, machine learning.

Сегодня технологии искусственного интеллекта внедрены во все области человеческой деятельности, они помогают людям автоматизировать рутинные процессы, искать закономерности и выводить алгоритмы, способствующие проведению многоаспектного анализа данных. Лес является одним из наиболее ценных ресурсов нашей страны, его площадь охватывает примерно 1179 млн. га, что соответствует 30,7% площади лесов планеты [1]. Предприятия лесопромышленного комплекса (целлюлозно-бумажные комбинаты, предприятия по обработке древесины) наращивают объемы выпуска продукции, внедряя в свою работу современные технологии и высокотехнологичные информационные системы.

Успех деятельности любого предприятия зависит от множества факторов, к которым можно отнести грамотно составленный бизнес-план, эффективную организацию логистических процессов, продуманное ценообразование и клиентоориентированность. Логистика как отрасль экономики является наукой об управлении разумным перенаправлением материальных потоков и сопровождающих их информационных и финансовых потоков, а также потоков услуг в транспортных цепях [2]. Организация грамотной цепочки поставок играет немаловажную роль в процессе доставки товара от поставщика к потребителю. Цепь поставок включает в себя несколько экономических единиц: поставщиков, производителей, потребителей, посредников, связанных между собой технологической цепочкой [3].

Проверка эффективности цепочки поставок может быть осуществлена с использованием различных методов и инструментов, которые помогают анализировать все этапы процесса и выявлять области для улучшения. Важные методы, которые можно использовать для этой цели: SWOT-анализ (позволяет выявить сильные и

слабые стороны, а также возможности и угрозы в цепочке поставок), ABC-анализ (исследует товарные запасы в зависимости от их важности и стоимости), анализ цепочки создания ценности (позволяет определить, где в цепочке поставок добавляется ценность, а где есть возможности для снижения затрат), моделирование и симуляция, бенчмаркинг(сравнение показателей цепочки поставок с показателями конкурентов или лучших практик в отрасли).Эти методы могут быть использованы как по отдельности, так и в комбинации для всестороннего анализа и проверки эффективности цепочки поставок.

Приведем пример SWOT - анализа организации цепочки поставок для предприятия лесопромышленного комплекса, выявим сильные и слабые стороны, возможности и угрозы, с которыми могут столкнуться предприятия (см. рис.1).

Рисунок 1 — SWOT-анализ организации эффективной цепочки поставок

Комплексный анализ, проведенный с использованием данного метода, позволит построить оптимальный бизнес-план, нарастить производственные мощности, заблаговременно предусмотреть возможные риски и снизить вероятность их возникновения.

Построение цепочки поставок достаточно сложный и трудоемкий процесс, который требует чёткого понимания особенностей бизнеса и потребностей клиентов. При организация грамотной транспортной цепи следует ориентироваться на: потребности и требования клиентов, определить ресурсы для производства и доставки товаров, утвердить принципы осуществления поставок, определить эффективные методы управления запасами, провести моделирование цепи и выбрать технологии, с помощью которых будет осуществляться управление.

Рассматривая вопрос планирования маршрута доставки товара, особое внимание следует уделить способам перемещения продукции, будет это перемещение сухопутным или нет. Использование определенных видов транспорта влечет за собой и варьирующуюся стоимость перевозки, а, следовательно, и возрастающие издержки. При выборе средства перевозки необходимо ориентироваться на множество факторов, среди которых дальность поездки, наличие связующих магистралей, погодные условия и географические особенности местности. Основными видами транспорта, которые могут быть использованы: автомобильный, железнодорожный, воздушный и водный [4]. Например, при перевозке груза из Санкт-Петербурга в Калининград доставка груза на железнодорожном транспорте будет производиться на расстояние 1474 км [5], на автомобильном транспорте 1018 км, водным 955 км, воздушным – 826 км (см. рис.2).

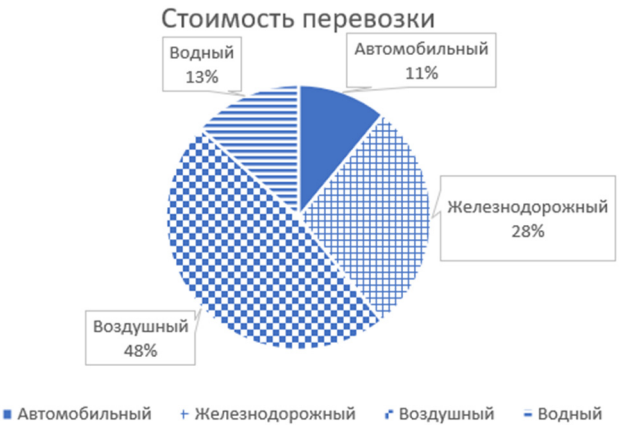


Рисунок 2 — Доля стоимости перевозки разными видами транспорта

Для организации оптимальной цепочки поставок необходимо исследовать множество факторов: структурных (отражают производственные мощности предприятия), коммерческих (воспроизводят бизнес-стратегию), операционных (отслеживают процессы перемещения товара) и функциональных (привязаны к транспортным ресурсам компании) [6]. Набор подобного рода факторов требует многокритериальной оценки по ряду показателей с применением методов прогнозирования и оптимизации. Для анализа статистической информации, полученной либо из открытых источников, либо из отчетных документов, предоставленных самой компанией, необходимо применение интеллектуальных методов и средств.

Машинное обучение как раздел искусственного интеллекта является наиболее обоснованным в применении в системах поддержки принятия решений для анализа больших объемов информации о состоянии логистической цепи, создании обучающих выборок, выявлении закономерностей и разработки алгоритмов, основываясь на которые информационная система может сгенерировать набор решений, представленный для выбора лицу, принимающему решения. При этом данные для обучающих выборок могут быть получены как с использованием статистической информации, так и методов Data Mining. Data Mining «добывает» информацию, анализируя данные, выводит скрытые зависимости между ними и строит гипотезы об их характере. В.А.Дюк выделяет 5 типов закономерностей, которые могут быть получены методами интеллектуального анализа данных: ассоциация, последовательность, классификация, кластеризация и временные закономерности [7].

Для обучения системы могут применятся различные типы обучения [8]:

1. Обучение с учителем. Применяется в тех случаях, когда любому набору исходных данных существует заранее известный ответ.
2. Обучение без учителя. Используется в случае, если необходимо найти скрытые зависимости в данных.
3. С прикреплением. Основывается на принятии решений, система учится и выбирает действия, приносящие максимальную выгоду.

Информационные системы, использующиеся на предприятиях любой из отраслей промышленности, отличаются значительным уровнем функциональности и затрагивают процессы, начиная с управления финансами и контроллинга, заканчивая организацией планирования и диспетчеризации. Особое внимание в таких системах уделяется построению транспортных маршрутов и оптимизации действующих цепочек поставок. При проведении аналитического обзора существующих анализаторов цепочек поставок [9, 10] было выявлено, что большинство анализаторов готовых коммерческих решений выступают в качестве отдельных модулей таких систем.

Обращаясь к вопросу логики построения анализаторов цепочек поставок лесопромышленного комплекса, следует исследовать методы, заложенные в механизм их функционирования. Такие анализаторы должны использовать в своей работе методы оценки эффективности, прогнозирования и поддержки принятия решений. Последовательность его работы должна придерживаться следующих этапов: сбор данных (включая определение источников данных, проведение упорядоченности и структурирования данных для дальнейшего анализа), анализ состояния действующей цепочки поставок (визуализация всех этапов построения цепочки поставок), выявление недостатков, разработка моделей и прогнозирование, оптимизация процессов, мониторинг и адаптация к изменениям.

Процесс принятия решений является сложным и трудоемким. Ситуация, в которой осуществляется принятие решений характеризуется [11]:

1. Наличием цели.
   1. Потребность в принятии решений диктуется поставленной целью. Если цель не поставлена, то и не возникает необходимость в принятии решений.
2. Существование различных вариантов выбора.
   2. Решения принимаются тогда, когда существует возможность выбора из различных вариантов достижения цели. Каждый из вариантов выбора может иметь разную вероятность прихода к цели и для его осуществления потребуются разные затраты. Выбор наилучшего варианта будет зависеть от утвержденного критерия оптимальности [10].
3. Присутствием ограничений.
   3. Решения, как правило, принимаются в условиях большого числа сдерживающих факторов, которые ограничивают возможность осуществления определенных действий. Факторы, подлежащие учету, могут быть разделены на: экономические, технические и специальные.

Приведем иллюстрацию, наглядно отражающую влияющие факторы на каждом этапе работы анализатора (см. рис. 3).

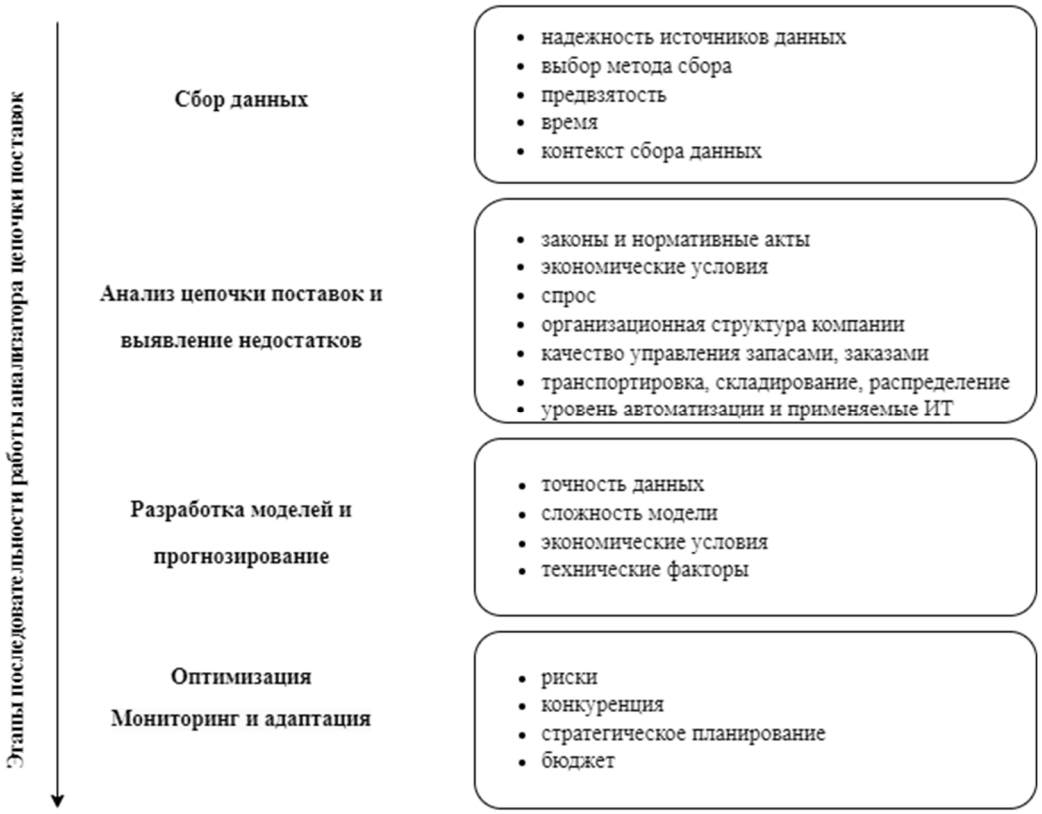


Рисунок 3 — Влияющие факторы на каждом этапе работы анализатора цепочки поставок

Обнаружение вышеназванных факторов должно предшествовать принятию решения. Ведь принятие решения подразумевает поиск наилучшего варианта достижения цели. Для предприятий лесной отрасли, в модулях анализа систем принятия решений могут применяться формальные (вероятностно-статистические, математического моделирования) и эвристические методы (имитационное моделирование) [12].

Логистика играет ведущую роль в функционировании предприятий лесопромышленной отрасли. Интеллектуальные технологии, которые внедряются в логистические системы позволяют провести комплексную автоматизацию процессов, обработать большие объемы информации и вывести скрытые зависимости. Применение методов машинного обучения дает возможность проводить анализ данных, выводя взаимосвязи между ними. В промышленной логистике задача принятия решений сводится к определению цели, вариативности выбора исходов и сдерживающих факторов. Использование формальных и эвристических методов принятия решений позволяет автоматизировать процессы построения цепочки поставок, тем самым повысив эффективность использования ресурсов и сократив временные затраты на доставку товара до потребителя.

Литература

1. Румянцев, Д. Е. Введение в лесное дело : учебное пособие для вузов / Д. Е. Румянцев. — Санкт-Петербург : Лань, 2024. — 168 с. — ISBN 978-5-507-48331-0. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: https://e.lanbook.com/book/380591 (дата обращения: 06.10.2024). — Режим доступа: для авториз. пользователей.

2. Тебекин, А. В. Логистика : учебник / А. В. Тебекин. — Москва : Дашков и К, 2021. — 356 с. — ISBN 978-5-394-04461-8. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: https://e.lanbook.com/book/229421 (дата обращения: 06.10.2024). — Режим доступа: для авториз. пользователей.

3. Основы управления цепями поставок : учебное пособие / составители Р. Г. Король [и др.]. — Хабаровск : ДВГУПС, 2021. — 91 с. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: https://e.lanbook.com/book/259499 (дата обращения: 06.10.2024). — Режим доступа: для авториз. пользователей.

4. Егоров, Ю. В. Ценообразование на транспорте : учебное пособие / Ю. В. Егоров. — Санкт-Петербург : ПГУПС, 2023. — 62 с. — ISBN 978-5-7641-1867-3. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: https://e.lanbook.com/book/349751 (дата обращения: 10.10.2024). — Режим доступа: для авториз. пользователей.

5. Расчет стоимости и экологичности грузовых перевозок // РЖД грузовые перевозки URL: https://cargolk.rzd.ru/services/calculator (дата обращения: 10.10.2024).

6. Постникова Т.В. Анализ факторов, влияющих на построение цепи поставок с учетом ограничений логистической инфраструктуры // Наука и образование. - 2012. - №5. - С. 434-444.

7. Москвитин, А. А. Данные, информация, знания: методология, теория, технологии : монография / А. А. Москвитин. — Санкт-Петербург : Лань, 2022. — 236 с. — ISBN 978-5-8114-3232-5. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: https://e.lanbook.com/book/206267 (дата обращения: 06.10.2024). — Режим доступа: для авториз. пользователей.

8. Баланов, А. Н. Машинное обучение и искусственный интеллект : учебное пособие для вузов / А. Н. Баланов. — Санкт-Петербург : Лань, 2024. — 172 с. — ISBN 978-5-507-49194-0. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: https://e.lanbook.com/book/414920 (дата обращения: 09.10.2024). — Режим доступа: для авториз. пользователей.

9. Еленская А.А. Обзор анализаторов цепочек поставок в логистике // Трансформация бизнеса и общественных институтов в условиях цифровизации экономики : сборник научных трудов VI Национальной (российской) научно-практической конференции, 2024. - С. 16-20.

10. Еленская, А. А. Обзор подходов к логике анализаторов цепочек поставок / А. А. Еленская, С. С. Колмогорова // ИТ. Наука. Креатив. Материалы I Международного форума: в 5-ти томах. Том 2. Информационные технологии и автоматизация управления, Омск, 14–16 мая 2024 года. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "Издательско-книготорговый центр "Колос-с", 2024. – С. 25-28.

11. Надеждин, Е. Н. Методы исследования операций: основы теории и практики : учебное пособие / Е. Н. Надеждин, Е. Е. Смирнова. — Тула : ТГПУ, 2018. — 280 с. — ISBN 978-5-6041454-8-7. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: https://e.lanbook.com/book/113618 (дата обращения: 11.10.2024). — Режим доступа: для авториз. пользователей.

12. Демин Г. А. Методы принятия управленческих решений [Электронный ресурс]: учеб. пособие / Г. А. Демин; Перм. гос. нац. исслед. ун-т.– Пермь, 2019. – 88 с.

Информация об авторах

Еленская Анна Александровна, аспирант, кафедра робототехнических систем и интеллектуальных технологий, Санкт-Петербургский лесотехнический университет им. С.М. Кирова (СПбГЛТУ им. С.М. Кирова), Россия, 194021, Санкт-Петербург, Институтский пер., д. 5, литера У, elenskayaaa1996@gmail.com

Колмогорова Светлана Сергеевна, доцент, к.т.н, доцент кафедры корабельных систем управления, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ «ЛЭТИ»), Россия, 197022, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5, литера Ф, ss.kolmogorova@mail.ru

Стариченков Алексей Леонидович, профессор, д.т.н, заведующий кафедрой корабельных систем и управления, СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Россия, 197022, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5, литера Ф

Мобильная робототехническая платформа, возводимая по технологии быстрореагирующего производства

С.В. Соленый, Е.С. Квас, А.В. Рысин✉, В.П. Косов, О.Е. Фёдоров, В.В. Назаренко
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» (ФГАОУ ВО ГУАП), Санкт-Петербург, Россия, a.rysin@guap.ru

Аннотация
В статье авторы предлагают способ применения технологии быстрореагирующего производства для разработки и изготовления мобильной робототехнической платформы, работающей в условиях ЧС. Перечислили преимущества использования данной технологии на конкретном примере. Представили сравнение бережливого производства и быстрореагирующего производства по ряду параметров.

Ключевые слова
Быстрореагирующее производство, мобильная робототехническая платформа, организация производственного процесса, QRM.

A mobile robotic platform being built using fast-reaction production technology

Sergey V. Soleny, Evgeny S. Kvas, Alexander V. Rysin✉, Vasily P. Kosov, Oleg E. Fedorov, Valery V. Nazarenko
Federal State autonomous educational institution of higher education «St. Petersburg state university aerospace instrumentation» (FGAOU IN GUAP), St. Petersburg, Russia, a.rysin@guap.ru

Abstract
In the article, the authors propose a way to apply the technology of fast-reacting production for the development and manufacture of a mobile robotic platform operating in emergency situations. We listed the advantages of using this technology on a specific example. We presented a comparison of lean manufacturing and fast-reaction manufacturing in a number of parameters.

Key words
Fast-reacting production, mobile robotic platform, organization of the production process, QRM.

Введение

В условиях динамичного развития научно-технического прогресса роботизация транспортных процессов является важным условием повышения эффективности логистических и производственных операций. Одной из основных задач в данной области является разработка и внедрение робототехнических устройств, предназначенных для перемещения грузов различной массы, формы и габаритов.

Актуальность задачи обусловлена недостатком таких устройств в ряде отраслей народного хозяйства. В связи с этим требуется оперативная разработка и производство робототехнических платформ. Успешное решение данной задачи требует гибкости производства и способности быстрой адаптации робототехнических устройств и производственных процессов.

Для этого целесообразно применение технологии быстрореагирующего производства (Quick Response Manufacturing), которая обеспечивает сокращение времени проектирования и сборки за счёт использования типовых комплектующих. Максимальное применение стандартных элементов повышает ремонтопригодность устройств, ускоряет модификацию платформ и позволяет гибко адаптировать их под изменяющиеся требования.

Технология быстрореагирующего производства

Основные принципы

В современных условиях рынок требует от организаций высокой гибкости и оперативности в ответ на изменение спроса. Эффективным подходом для достижения этих целей является концепция быстрореагирующего производства (Quick Response Manufacturing, QRM). Основные принципы QRM, направленные на сокращение времени выполнения заказов и повышение конкурентоспособности:

– минимизация времени выполнения всех этапов производственного процесса, от получения заказа до его доставки. Оптимизация охватывает проектирование, производство, сборку и логистику. Организации, внедряющие QRM, устраняют «узкие места», влияющие на задержки обеспечивая сокращение времени выполнения;

– QRM ориентирован на создание гибкой системы, способной быстро адаптироваться к изменениям спроса. Это достигается за счёт модульной структуры производства и перекрёстного обучения сотрудников, что позволяет быстро перераспределять ресурсы;
– использование системы управления потоками, таких как POLCA, позволяет минимизировать запасы и улучшить скорость реакции на заказы, что сокращает общее время выполнения;
– применение модульных компонентов обеспечивает быстрое производство и возможность адаптации к изменениям спроса, упрощает обслуживание и модернизацию.

Преимущества применения

Основное преимущество QRM заключается в его способности быстро реагировать на изменения в спросе и требованиях клиентов, что становится особенно важным в условиях неопределенности на рынке. В отличие от бережливого производства, которое фокусируется на устранении потерь и оптимизации процессов, QRM подчеркивает важность сокращения времени выполнения и гибкости, что позволяет компаниям более эффективно справляться с изменениями в заказах и колебаниями потребительских предпочтений. QRM также более ориентирован на краткосрочные цели, что позволяет быстрее адаптироваться к требованиям клиентов, в то время как бережливое производство может быть более медленным в своем подходе к внедрению изменений.

Основные отличия технологии быстрореагирующего производства (QRM) и бережливого производства (LM) приведены в таблице 1. Две рассмотренные методологии отличаются в первую очередь стратегической ориентацией. LM нацелено на создание большего с помощью минимальных средств. Иными словами, LM постоянно выявляет потери любого плана и их ликвидирует. QRM нацелено на единственную цель – уменьшение времени цикла производства от получения заявки и до сдачи продукта заказчику. [1]

Таблица 1 — Таблица ключевых отличий QRM и LM

Критерий	Быстрореагирующее производство (QRM)	Бережливое производство (Lean Manufacturing)
Основная цель	Сокращение времени выполнения заказов	Устранение потерь и оптимизация процессов
Адаптивность	Высокая гибкость и способность быстро реагировать на изменения	Фиксация на стандартных процессах, что может ограничивать адаптивность
Структура организации	Децентрализованное принятие решений	Централизованный контроль и стандартизация процессов
Фокус на клиенте	Высокая ориентированность на потребности и предпочтения клиентов	Ориентированность на эффективность и снижение затрат
Вовлеченность сотрудников	Повышенная автономия и вовлеченность работников	Стандартизированные роли могут ограничивать вовлеченность
Скорость внедрения изменений	Быстрое внедрение новых продуктов и изменений в производстве	Изменения могут требовать времени для внедрения из-за необходимости пересмотра процессов
Устойчивость к неопределенности	Высокая устойчивость к изменениям в рыночной среде	Может быть менее адаптивным в условиях высокой изменчивости
Инновации	Стимулирование инноваций и экспериментов	Часто придерживается традиционных методов, ограничивая новшества

Примеры использования QRM

Согласно статье Маркова Д.А. «БЕРЕЖЛИВОЕ ПРОИЗВОДСТВО И БЫСТРОРЕАГИРУЮЩИЕЕ ПРОИЗВОДСТВО» [2] технология QRM была успешно внедрена в ряде компаний, например таких как:
– АО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания».
– ЗАО ЧП «Сеспель» (г. Чебоксары).
– National Oilwell Varco. Увеличила оборот с 3 млрд долларов в 2005 году до 21 млрд долларов в 2014 году.
– Renew Air. За 10 лет использования QRM удвоила долю рынка и увеличила доход на 254% (при сокращении рынка на 25% с 2008 по 2011 гг.).
– Ulefos Esco. Сократила время цикла с 44 дней до 7 дней и снизила количество брака на 30%.
– Nicolet Plastics. За 5 лет внедрения QRM стабильно увеличивала сбыт на 10–15% в год и повысила выработку на 1 работника со 100 до 170 тыс. долларов.

Также примером может служить голландский производитель BOSCH Scharnieren, которому удалось значительно сократить время выполнения заказа и оптимизировать производственный процесс в своём цехе, используя принципы QRM.

Данную технология применима не только к компаниям, выпускающим потоковую продукцию, но и к экспериментальным производствам, не имеющим собственные участки и заказывающих изготовление на стороне [3].

Описание мобильной робототехнической платформы

Для рассмотрения применения технологии быстрореагирующего производства (Quick Response Manufacturing) в качестве объекта проектирования и производства выбрана мобильная робототехническая платформа для работы в условиях ЧС. На рисунке 1 представлена визуализация мобильной робототехнической платформы.

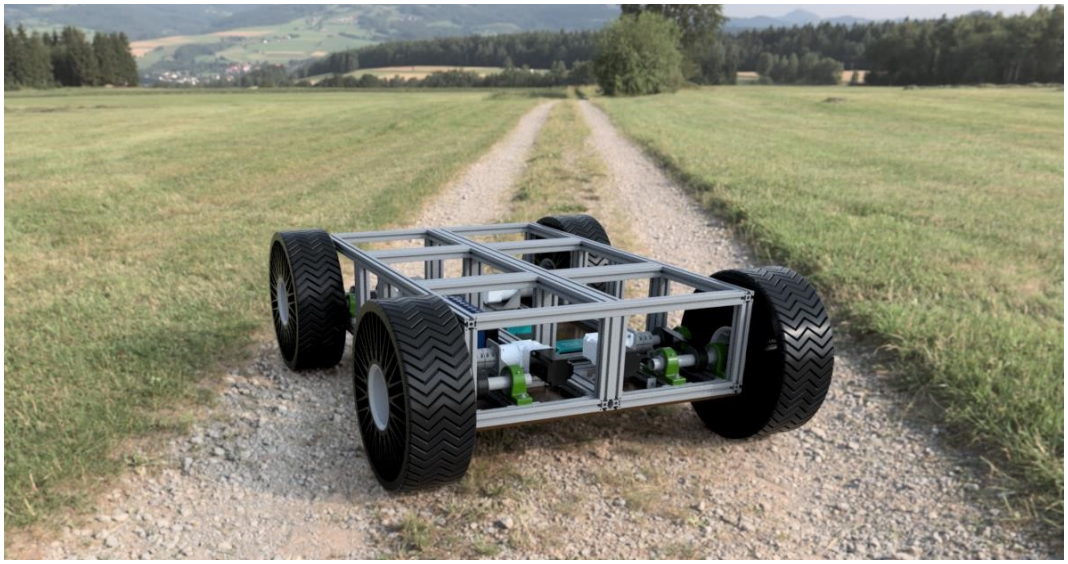


Рисунок 1 — Визуализация мобильной робототехнической платформы

Мобильная робототехническая платформа – наземное транспортное устройство, используемое для выполнения сервисных работ, не подразумевающее присутствие человека в ней [4].

Общее представление

Мобильная робототехническая платформа представляет собой модульную систему в основе которой используются преимущественно типовые компоненты. Применение стандартных элементов обусловлено необходимостью обеспечения гибкости производства при изменении спроса, что позволяет избежать значительной реорганизации производственных процессов, снижая затраты ресурсов и обеспечивая конкурентные преимущества.

Важным фактором является сокращение времени проектирования. Использование унифицированных деталей упрощает процесс компоновки изделия, минимизирует необходимость разработки новых технологий для их изготовления, а также ускоряет проведение прочностных расчётов.

Такая платформа может быть использована в различных отраслях экономики для транспортировки объектов разной формы и массы, что делает её универсальным решением для задач логистики и автоматизации.

В условиях чрезвычайных ситуаций эвакуация пострадавших представляет собой одну из важнейших задач спасательных операций, особенно в условиях потенциальной опасности для людей. Однако разработка подобных систем требует соблюдения ряда определенных требований, которые вытекают как из условий применения, так и из конструкционных особенностей.

Описание конструкции

Рассмотрим основные технические характеристики разрабатываемого мобильного робота с акцентом на его ключевые функции: быстрая эвакуация раненых, способность работы в сложных условиях, а также соответствие стандартам безопасности и надежности.

Основной каркас робота (Рисунок 2) выполнен из конструкционного профиля что обеспечивает высокую прочность при минимальном весе. Также данная конструкция является модульной, что позволяет легко производить ремонт или модернизацию. Клиренс позволяет преодолевать препятствия высотой не более 200мм в целях эффективного перемещения в условиях сложного ландшафта. Описываемая конструкция мобильного робота обладает грузоподъемностью в 150 кг., что позволяет транспортировать минимум одного человека.

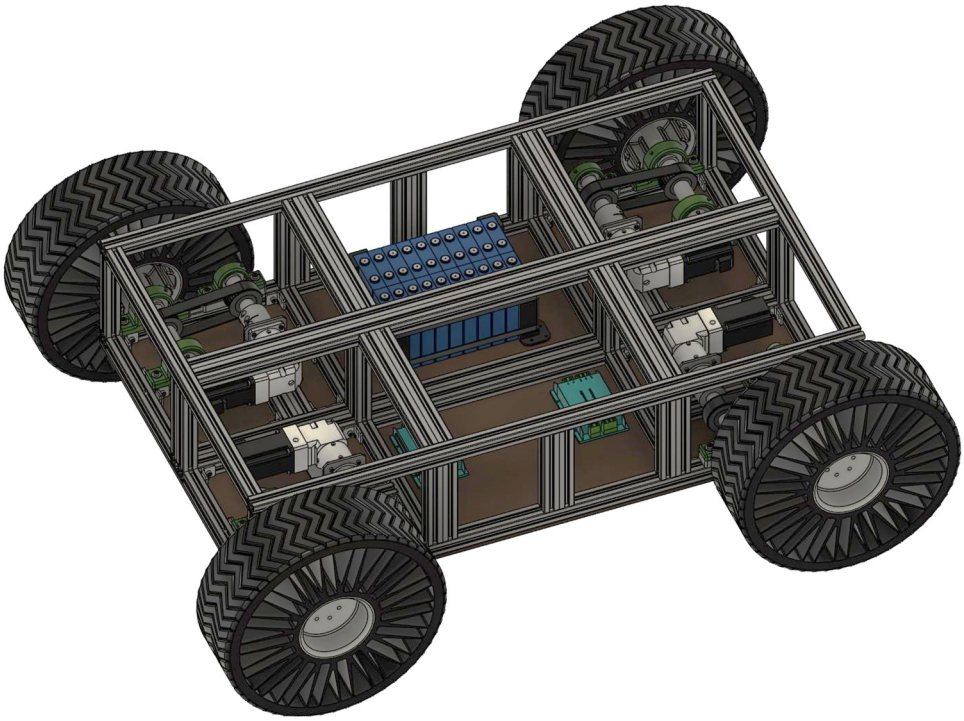


Рисунок 2 — Мобильная платформа. Общий вид без обшивки

В качестве приводного устройства, изображенного на рисунке 3, используется модульная система на базе бесколлекторных моторов с планетарным редуктором, обеспечивающая устойчивое и плавное перемещение на различных типах поверхности (асфальт, грунт, песок, щебень и т.д.). Амортизацию при перемещении по неровностям обеспечивают полиуретановые безвоздушные покрышки. Данная конфигурация привода позволяет преодолевать склоны в 30°, а также перемещаться со скоростью 3-5 км/ч, с возможностью ускорения до 10 км/ч.

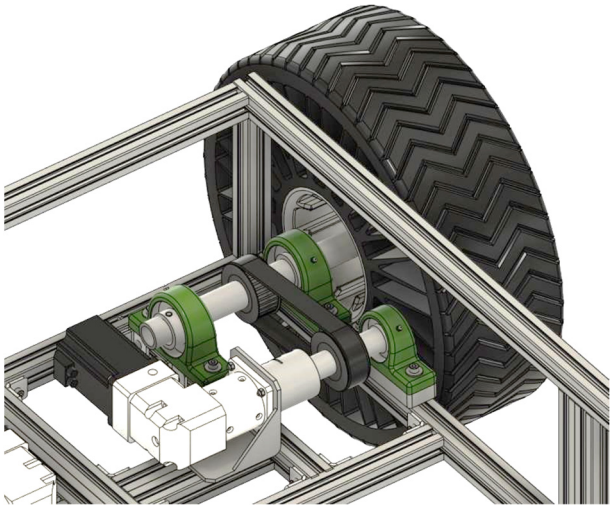


Рисунок 3 — Приводное устройство

Для управления бесколлекторными электродвигателями используются электрические контроллеры скорости (англ. Electric Speed Controller, далее – ESC, рисунок 4). Такие контроллеры принимают ШИМсигнал, кодирующий задаваемую скорость, а ESC преобразует входящий сигнал в правильную последовательность включения обмоток электродвигателя.

Для обеспечения хорошей обзорности оператора спереди робототехнической платформы установлена камера с широкоугольным объективом. Также камеры установлены в задней и правой частях платформы. Камеры являются аналоговыми.

Главным контроллером, управляющим всей электроникой, является 12-канальный полетный контроллер, принимающий радиосигнал и выдающий ШИМ сигнал.

Система электропитания мобильного робота, построена на основе литий-железо-фосфатных ($LiFePO_4$) аккумуляторных ячеек высокой емкости с возможностью быстрой замены и подзарядки. Это обеспечивает высокую надежность, долговечность и безопасность эксплуатации. Блок ячеек представлен на рисунке 5.

Рисунок 4 — Блок управления бесколлекторным электродвигателем

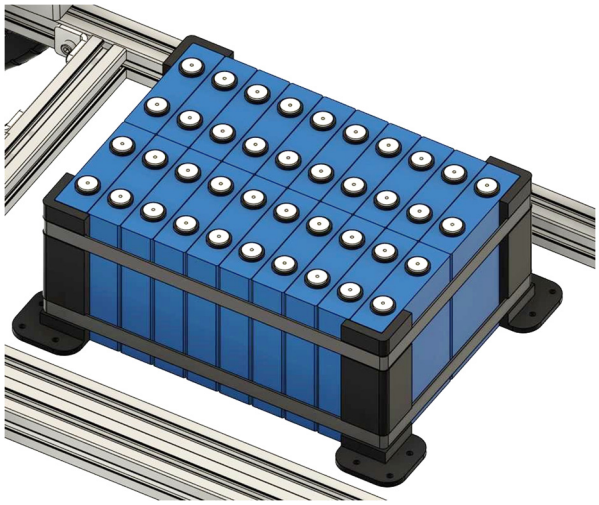


Рисунок 5 — Аккумуляторный блок

Система управления батареей (Battery Management System) контролирует процесс зарядки и разрядки аккумуляторов, защищая от перегрева, перезаряда и короткого замыкания. BMS также отслеживает состояние каждой ячейки и предотвращает неравномерную деградацию аккумуляторных ячеек. Встроенные системы балансировки обеспечивают равномерный заряд всех аккумуляторных ячеек, что увеличивает общую эффективность работы батареи и её долговечность. Данная система энергопитания обеспечивает автономную работу без подзарядки не менее 6-8 часов при номинальной нагрузке.

В таблице 2 представлены технические характеристики рассматриваемой модели мобильной системы.

Таблица 2 — Технические характеристики

Параметр	Значение
ДхШхВ	2000x1400x550
Масса	250кг
Грузоподъемность	150кг
Тип колес	Безвоздушные покрышки
Количество колес	От 4
Время работы	6-8 часов (в зависимости от условий)
Номинальная скорость	3-5 км/ч
Максимальная скорость	10 км/ч
Тип связи	GPS/глонас, WI-FI
Тип аккумулятора	LiFePo4
Напряжение аккумулятора	48 В
Емкость аккумулятора	105 А/ч
Диапазон температур эксплуатации	от -20°С до +50°С
Защита от воды и пыли	класс защиты IP65

Описание программной части

При запуске робототехнической платформы производится сопряжение радиоаппаратуры управления и аналоговой передачи видео.

Ключевой особенностью представляемой робототехнической платформы является использование радиосистемы с возможностью практически бесшовной смены частот для обхода средств РЭБ [5].

С помощью пульта управления производится управление робототехнической платформой: управление движением, управление переключением частоты, управление видеосигналом. Также, при добавлении других контролируемых устройств, они тоже могут управляться с пульта за счет большой канальности радиоаппаратуры.

С помощью специального переключателя на пульте управления при возникновении необходимости провести осмотр ситуации вокруг робота, оператор с помощью специального тумблера может переключаться между камерами, установленными по периметру робота.

Разработка мобильной платформы с использованием технологии быстрореагирующего производства

Цикл производства

Цикл производства с учетом использования технологии быстрореагирующего производства представлен на рисунке 6. Данный цикл описывает производство 1 единицы продукции при смене 8 часов. Высокую конкурентоспособность данного производства обеспечивает скорый цикл изготовления в 3.9 человеко-дней. Например, командой из 20 сборщиков, слесарей и монтажников можно выпускать 5 единиц продукции в день.

Рисунок 6 — Цикл производства

Учитывая несложный процесс изготовления, который состоит в основном из простых операций, можно легко переконфигурировать производство под другое исполнение оборудования. Это обеспечивается выбором типовых комплектующих таких как конструкционный профиль или ячейки LiFePo4 аккумуляторного блока.

Выбор стратегии QRM для производства мобильных-платформ предоставляет следующие преимущества:

– модульность. Конструкционный профиль позволяет быстро адаптировать размеры и компоновку платформы под различные задачи и условия эксплуатации. Это также позволяет быстро вносить изменения в конструкцию в процессе эксплуатации, что идеально вписывается в принципы QRM;

– скорость разработки и сборки. За счёт модульного подхода и использования стандартизированных решений, платформа может быть разработана и собрана значительно быстрее по сравнению с традиционными методами;
– гибкость и адаптивность конструкции. Возможность быстро вносить изменения в конструкцию и компоненты позволяет адаптировать платформу под конкретные задачи в кратчайшие сроки;
– экономическая эффективность. Простота производства, низкая стоимость инструментов для работы с конструкционным профилем и невысокая квалификация специалистов сокращает затраты на производство роботов, делая их доступнее для массового применения.

Ресурсы и оборудование

Выбор ресурсов обеспечит простоту поиска и использования помещения для производства, найма персонала, покупки оборудования и реализации комплектующих. Для производства робототехнических платформ используются такие ресурсы, как:

Персонал:
– инженеры. В условиях трансформации производства скоординируют сборочный участок, а также обеспечат технический контроль на всех этапах;
– монтажники. Монтаж электронных компонентов и кабелей;
– слесари. Распил и сверление конструкционного профиля;
– сборщики. Сборка рамы, модулей мотор-колес, установка датчиков, камер и вспомогательных устройств.

Инструменты и оборудование:
– компьютеры с CAD-системами для проектирования;
– торцовочная пила для резки профиля;
– сверлильный станок для сверления отверстий;
– ручной инструмент (шестигранники, кусачки, шуруповёрты).

Основные комплектующие:
– конструкционный профиль и фурнитура;
– электрические двигатели;
– редукторы;
– колеса;
– камеры, датчики;
– аккумуляторные ячейки LiFePo4;
– управляющий контроллер;
– сопутствующая электроника: драйверы, передатчики, стабилизаторы.

При использовании перечисленных ресурсов наша стратегия позволит в кратчайшие сроки развернуть производство и при необходимости быстро произвести переналадку под аналогичную продукцию.

Система POLCA для координации работы

POLCA (Paired-cell Overlapping Loops of Cards with Authorization) является одной из эффективных систем управления производственными потоками и координацией работы в условиях высокой вариативности. В данном случае, данная система позволяет оптимизировать взаимодействие между различными этапами сборки, что немало важно для обеспечения гибкости и своевременности выполнения заказов, учитывая индивидуальные требования заказчиков к каждому роботу.

Производство мобильных роботов из конструкционных профилей зачастую включает несколько стадий, таких как сборка рамы, установка двигателей, монтаж систем управления и пуско-наладочные работы. Каждая из этих стадий может сильно варьироваться в зависимости от специфики заказа и требований клиента. POLCA, с использованием карт для авторизации передачи работы между ячейками, предотвращает накопление незавершенного производства (WIP) и гарантирует, что каждый участок сборки начнет работу только тогда, когда выполнен предыдущий этап сборки. Это позволяет минимизировать простой оборудования и человеческих ресурсов.

Для производства мобильных роботов такая система крайне удобна, так как процесс сборки зачастую включает разнообразие компонентов с различными параметрами и требованиями по установке и настройке. Использование POLCA дает возможность адаптировать производственные линии под изменяющийся спрос, особенно в условиях кастомизации каждого робота.

Таким образом, внедрение системы POLCA в производство мобильных роботов из конструкционных профилей позволяет улучшить контроль за производственными процессами, снизить затраты на хранение используемых компонентов, сократить время выполнения заказов и обеспечить гибкость, необходимую для адаптации к поступающим требованиям от заказчиков.

Заключение

В данной научной статье рассмотрена технология быстрореагирующего производства (QRM), а также пример ее применение на основе разработки мобильной робототехнической платформы. Технология QRM является мощным инструментом для повышения эффективности разработки и быстрой организации производства за счет оптимизации процессов, гибкости и оперативности в принятии решений. Применение основных принципов QRM позволяет снизить время производственного цикла, увеличить качество конечного продукта и обеспечить более рациональное использование ресурсов.

Модульный подход и гибкость систем на базе конструкционного профиля открывают широкие возможности для адаптации мобильных платформ под различные задачи, что особенно актуально в условиях быстро меняющихся требований к технологическим процессам. Использование системы POLCA для координации производственных процессов обеспечило синхронность и эффективность выполнения задач на всех этапах производства, что значительно сокращает время выхода прототипа.

Таким образом, сочетание технологий быстрореагирующего производства и современных инженерных решений в области робототехники позволяет достигать высоких показателей в разработке инновационных продуктов для работы в различных условиях, обеспечивая надежность и безопасность их использования.

Литература

1. Алексеев А. Современные методологии управления производством // Habr. 2014. URL: https://habr.com/ru/articles/234687/ (дата обращения: 09.09.2024).

2. Марков С.Н. Применение современных методов управления в экономике // Вектор экономики. 2017. № 9. URL: http://www.vectoreconomy.ru/images/publications/2017/9/economicsmanagement/Markov.pdf (дата обращения: 03.09.2024).

3. Ваганова И. QRM — тернистый путь // Управление производством, 2020. URL: https://uppro.ru/library/production_management/optimization/qrm-termistyj-put/ (дата обращения: 03.09.2024).

4. Спасский Б.А., Лопота А.В. Введение в робототехнику: учеб. пособие. СПб.: ООО "Группа МИД", 2023. 162 с.

5. Лопота, А. В. Современные тенденции развития робототехнических комплексов [Электронный ресурс] / А. В. Лопота, А. Б. Николаев // Наземные робототехнические комплексы военного и специального назначения. — СПб.: РТК, 2020. — URL: https://rtc.ru/media/images/docs/book/nazemnie.pdf (дата обращения: 09.09.2024).

Информация об авторах

Соленый Сергей Валентинович, к.т.н., доцент, Государственный университет аэрокосмического приборостроения (ГУАП), Россия, 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А

Квас Евгений Станиславович, старший преподаватель, ГУАП, Россия, 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А

Рысин Александр Владимирович, старший преподаватель, ГУАП, Россия, 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А, a.rysin@guap.ru

Косов Василий Павлович, студент, ГУАП, Россия, 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А

Фёдоров Олег Евгеньевич, студент, ГУАП, Россия, 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А

Назаренко Валерий Валерьевич, студент, ГУАП, Россия, 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А

ТРУДЫ

35-й Международной научно-технической конференции

«ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ РОБОТОТЕХНИКА»

29-30 октября 2024 года,
Санкт-Петербург, Россия

PROCEEDINGS

of the 35th International Scientific and Technological Conference

«EXTREME ROBOTICS»

October 29-30, 2024,
Saint Petersburg, Russia

ТЕМАТИКА КОНФЕРЕНЦИИ

29-30 ОКТЯБРЯ

Наземная робототехника

29-30 ОКТЯБРЯ

Морская робототехника

29-30 ОКТЯБРЯ

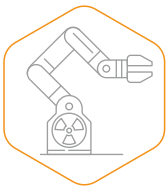
Технологии искусственного интеллекта и цифровые технологии разработки в робототехнике

29 ОКТЯБРЯ

Образовательная робототехника

29 ОКТЯБРЯ

Беспилотные авиационные системы



30 ОКТЯБРЯ

Роботизация атомной отрасли

30 ОКТЯБРЯ

Медицинская робототехника

30 ОКТЯБРЯ

Космическая робототехника

30 ОКТЯБРЯ

Промышленная и логистическая робототехника

29 ОКТЯБРЯ

Робототехника специального назначения *(по приглашениям)*

29 ОКТЯБРЯ

Заседание Технического комитета ТК-141 *(по приглашениям)*

Контакты

+7 (812) 552-45-21

mrspb@rtc.ru er.rtc.ru

29-30 ОКТЯБРЯ 2024 года

Cosmos St. Petersburg Pulkovskaya Hotel
Санкт-Петербург, площадь Победы, д. 1

ОРГАНИЗАТОРЫ

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ
И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

РТК

ГНЦ РФ «Центральный научно-исследовательский
и опытно-конструкторский институт робототехники
и технической кибернетики» (ГНЦ РФ ЦНИИ РТК)

+7(812)552-45-21 mrspb@rtc.ru er.rtc.ru