Труды
Международной научно-технической конференции

ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ РОБОТОТЕХНИКА И КОНВЕРСИОННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ

7-8 июня 2018 года, Санкт-Петербург

Proceedings
of the International Scientific and Technological Conference

EXTREME ROBOTICS AND CONVERSION TENDENCIES

June 7-8, 2018, Saint-Petersburg, Russia

er.rtc.ru

УДК 004.896.007.5:338.23
ББК 32813
Э41

ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ РОБОТОТЕХНИКА И КОНВЕРСИОННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ. // Труды Международной научно-технической конференции. – Санкт-Петербург: 2018. – 542 с.

Материалы сборника отражают круг актуальных проблем и задач в сфере робототехнических систем и средств безопасности, представленных на Международной научно-технической конференции «ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ РОБОТОТЕХНИКА И КОНВЕРСИОННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ (ЭР-2018)».

Доклады опубликованы в авторской редакции.

Дизайн Ирины Купцовой, e-mail: kuptzova@rtc.ru

EXTREME ROBOTICS AND CONVERSION TENDENCIES. // Proceedings of the International Scientific and Technological Conference. –Saint-Petersburg: 2018. – 542 p.

The materials of these collected articles embrace a range of vital problems and tasks in the sphere of safety facilities and robotic systems intended for a space activity which have been discussed at the International Scientific and Technological Conference «EXTREME ROBOTICS AND CONVERSION TENDENCIES (ER-2018)».

Reports are published with author's correction only.

Design by Irina Kuptcova, e-mail: kuptzova@rtc.ru

ISBN 978–5–907050–39–6

©ЦНИИ робототехники и технической кибернетики, 2018

Основатель и первый директор ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, д.т.н., профессор,
заслуженный деятель науки и техники Российской Федерации,
почетный главный конструктор ГНЦ РФ ЦНИИ РТК,
почетный сопредседатель программного комитета конференции
«ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ РОБОТОТЕХНИКА
И КОНВЕРСИОННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ»
Юревич Евгений Иванович

Founder and First Director of the Russian Scientific Center for Robotics and
Technical Cybernetics (RTC), Doctor of Technical Sciences, Professor,
Honoured Science and Technology Worker of the Russian Federation,
Honorary Chief Designer of RTC,
Honorary Co-Chairman of the Program Committee of
EXTREME ROBOTICS AND CONVERSION TENDENCIES Conference
Evgeny Yurevich

ОРГАНИЗАТОР

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

ПРИ ПОДДЕРЖКЕ

- *Министерства науки и высшего образования Российской Федерации*
- *Военно-промышленной комиссии Российской Федерации*
- *Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий*
- *Министерства здравоохранения Российской Федерации*
- *Российской академии наук*
- *Ассоциации государственных научных центров «Наука»*
- *Общероссийского отраслевого объединения работодателей «Союз машиностроителей России»*
- *Правительства Санкт-Петербурга*
- *Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (СПбПУ)*
- *ФГБУ «НМИЦ им. В.А. Алмазова» Минздрава России*

ИНФОРМАЦИОННАЯ ПОДДЕРЖКА

- *Теоретический и прикладной научно-технический журнал «Мехатроника, автоматизация, управление», Москва*
- *Журнал «Труды СПИИРАН», Санкт-Петербург*
- *Научно-технический журнал «Робототехника и техническая кибернетика», Санкт-Петербург*
- *Журнал «Новый Оборонный Заказ. Стратегии», Санкт-Петербург*

ORGANIZER

- *Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics (RTC), Saint-Petersburg, Russia*

WITH SUPPORT OF

- *Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation*
- *Military-Industrial Commission of the Russian Federation*
- *EMERCOM of Russia*
- *Ministry of Health of the Russian Federation*
- *Russian Academy of Sciences*
- *State Scientific Centers of the Russian Federation Association*
- *All-Russian branch association of employers «Russian Engineering Union»*
- *Government of St. Petersburg*
- *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*
- *Almazov National Medical Research Centre of the Ministry of Health of the Russian Federation*

INFORMATION SUPPORT

- *Journal «Mechatronics, Automation, Control», Moscow, Russia*
- *Journal «Proceedings SPIIRAS», Saint-Petersburg, Russia*
- *Journal «Robotics and Technical Cybernetics», Saint-Petersburg, Russia*
- *Journal «New Defensive Order. Strategy», Saint-Petersburg, Russia*

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

Председатель:

- ***Мартьянов Олег Викторович**, член Военно-промышленной комиссии Российской Федерации (ВПК РФ), руководитель межведомственной рабочей группы ВПК РФ*

Почетный сопредседатель:

- ***Юревич Евгений Иванович**, д.т.н., профессор, почетный главный конструктор ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург*

Заместитель председателя:

- ***Грязнов Николай Анатольевич**, к.ф.-м.н., заместитель директора по научной работе ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург*

Ученый секретарь:

- ***Павлов Владимир Анатольевич**, к.т.н., заместитель начальника сектора ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург*

Члены программного комитета:

- ***Альбу-Шаффер Алин**, доктор, профессор, директор Института робототехники и мехатроники Германского космического агентства (DLR), Германия*
- ***Андреев Виктор Павлович**, д.т.н., профессорМГТУ «СТАНКИН», Москва*
- ***Заборовский Владимир Сергеевич**, д.т.н., профессор СПбПУ; заместитель главного конструктора ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург; член Международной ассоциации академических, исследовательских и промышленных предприятий (IARIA)*
- ***Каляев Игорь Анатольевич**, академик РАН, заместитель председателя Научного совета по робототехнике и мехатронике РАН; научный руководитель направления ЮФУ, г. Таганрог*
- ***Каприн Андрей Дмитриевич**, академик РАН, генеральный директор ФГБУ «НМИРЦ» Минздрава России, г. Обнинск*
- ***Каталинич Бранко**, доктор, президент Международной ассоциации DAAAM, Австрия*
- ***Максимов Андрей Станиславович**, председатель Комитета по науке и высшей школе Санкт-Петербурга*
- ***Павловский Владимир Евгеньевич**, д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник ИПМ им. М.В. Келдыша РАН; член Научного совета по робототехнике и мехатронике РАН, Москва*
- ***Пешехонов Владимир Григорьевич**, академик РАН, генеральный директор Государственного научного центра РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург*
- ***Плегер Пауль**, доктор, профессор университета прикладных наук Бонн-Рейн-Зига, Германия*
- ***Пряничников Валентин Евгеньевич**, д.т.н., профессор ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, Москва; представитель Международной ассоциации по автоматизации в машиностроении (DAAAM International Vienna) в России*
- ***Романов Алексей Александрович**, д.т.н., заместитель генерального директора по науке АО «Российские космические системы», Москва*
- ***Ронжин Андрей Леонидович**, д.т.н., профессор, врио директора СПИИРАН, Санкт-Петербург*
- ***Филимонов Николай Борисович**, д.т.н., профессор, главный редактор теоретическиго и прикладного научно-технического журнала «Мехатроника, автоматизация, управление (МАУ)», Москва*
- ***Цариченко Сергей Георгиевич**, д.т.н., начальник испытательного полигона ФКП «НИИ «Геодезия», г. Красноармейск, Моск. обл.*
- ***Шляхто Евгений Владимирович**, академик РАН, директор ФГБУ «НМИЦ им. В.А. Алмазова» Минздрава России, Санкт-Петербург*
- ***Ющенко Аркадий Семенович**, д.т.н., профессор, заместитель заведующего кафедрой «Робототехнические системы и мехатроника» МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва*

CONFERENCE PROGRAM COMMITTEE

Chairman:

- ***Martyanov Oleg**, Head of the Interagency Task Force of the Military-Industrial Commission of the Russian Federation*

Honorary Co-Chairman:

- ***Yurevich Evgeny**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Honorary Chief Designer of RTC, Saint-Petersburg*

Deputy Chairman:

- ***Gryaznov Nikolay**, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Deputy Director for Science of RTC, Saint-Petersburg*

Academic Secretary:

- ***Pavlov Vladimir**, Candidate in Technical Sciences, Deputy Head of Department, RTC, Saint-Petersburg*

Members of Program Committee:

- ***Albu-Schäffer Alin Olimpiu**, Doctor, Professor, Director of DLR Institute of Robotics and Mechatronics, Germany*
- ***Andreev Victor**, Doctor of Technical Sciences, Professor of Moscow State Technical University of Technology «STANKIN», Moscow*
- ***Filimonov Nikolay**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Editor of monthly scientific-and-technological and production journal «Mechatronics, Automation and Control», Moscow*
- ***Kalyaev Igor**, Academician of the RAS, vice-chairman of RAS Academic Council on Robotics and Mechatronics; research supervisor of the direction of SFU, Taganrog town*
- ***Kaprin Andrey**, Academician of the RAS, Director General of National Medical Research Radiological Center of the Ministry of Health of the Russian Federation, Obninsk town*
- ***Katalinic Branko**, Doctor, President of the DAAAM International Association, Austria*
- ***Maksimov Andrey**, Chairman of Committee for science and Higher School of Saint-Petersburg*
- ***Pavlovsky Vladimir**, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, leading researcher of Institute for Problems in Mechanics of the RAS, Moscow; member of RAS Academic Council on Robotics and Mechatronics*
- ***Peschehonov Vladimir**, Academician of the RAS, General Director of Concern CSRI Elektropribor, JSC, Saint-Petersburg*
- ***Ploeger Paul**, Doctor, Professor Bonn-Rhein-Sieg University of Applied Science, Germany*
- ***Pryanichnikov Valentine**, Doctor of Technical Sciences, Professor of Institute for Problems in Mechanics of RAS, Moscow; representative of the International Association «DAAM International Vienna» in Russia*
- ***Romanov Alexey**, Doctor of Technical Sciences, Deputy General Director for Science of «Russian Space Systems», JSC, Moscow*
- ***Ronzhin Andrey**, Doctor of Technical Sciences, Deputy Director for Research of St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences*
- ***Shlyakhto Evgeny**, Academician of the RAS, Director General of the Almazov National Medical Research Centre, Saint-Petersburg*
- ***Tsarichenko Sergey**, Doctor of Technical Sciences, Head of the proof ground of Research Institute «Geodeziya», Krasnoarmeisk, Moscow region*
- ***Yushchenko Arkady**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Baumann State Technical University, Moscow*
- ***Zaborovsky Vladimir**, Doctor of Technical Sciences, Professor of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU); Director of Institute of Computer Sciences and Technologies of SPbPU; the head of the department «Telematics» at RTC; Deputy Chief Designer of RTC, Saint-Petersburg; member of the International Academy, Research and Industry Association (IARIA)*

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

Председатель:

- ***Лопота Александр Витальевич**, д.т.н., директор-главный конструктор ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург*

Заместитель председателя:

- ***Коренко Наталья Львовна**, руководитель Информационно-аналитического центра ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург*

Секретарь:

- ***Вольпяс Татьяна Владимировна**, заместитель начальника сектора ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург*

Члены организационного комитета:

- ***Горская Ирина Васильевна**, генеральный директор АГНЦ «Наука», Москва*
- ***Гутенев Владимир Владимирович**, первый заместитель Председателя Союза машиностроителей России, первый заместитель председателя Комитета ГД по экономической политике, промышленности, инновационному и предпринимательству Общероссийского отраслевого объединения работодателей «Союз машиностроителей России»*
- ***Емельянов Сергей Геннадьевич**, д.т.н., профессор, ректор ЮЗГУ, г. Курск*
- ***Ермолов Иван Леонидович**, д.т.н., ИПМех РАН, Москва; ученый секретарь Научного совета РАН по робототехнике и мехатронике; представитель Европейской ассоциации по робототехнике (EURON)*
- ***Иванов Александр Владиславович**, начальник научно-производственного комплекса ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург*
- ***Катенев Владимир Иванович**, председатель Совета Санкт-Петербургской торгово-промышленный палаты*
- ***Кондратьев Александр Сергеевич**, к.т.н., заместитель директора ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург*
- ***Кудж Станислав Алексеевич**, д.т.н., ректор ФГБОУ ВО «Московский технологический университет»*
- ***Лобин Михаил Александрович**, генеральный директор исполнительной дирекции, первый вице-президент ОО «Союз промышленников и предпринимателей Санкт-Петербурга»*
- ***Мейксин Максим Семенович**, председатель Комитета по промышленной политике и инновациями Санкт-Петербурга*
- ***Михайлов Борис Борисович**, к.т.н., доцент кафедры «Робототехнические системы и мехатроника» МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва*
- ***Рудской Андрей Иванович**, академик РАН, ректор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого*
- ***Уемура Кензуке**, доктор, директор ITAC Ltd, Япония*
- ***Юдин Виктор Иванович**, к.ф.-м.н., заместитель главного конструктора ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург*

CONFERENCE ORGANIZING COMMITTEE

Chairman:

- ***Lopota Alexander**, Doctor of Technical Sciences, Director and Chief Designer of RTC, Saint-Petersburg*

Deputy Chairman:

- ***Korenko Natalia**, Head of Center for Information and Analysis, RTC, Saint-Petersburg*

Secretary:

- ***Volpyas Tatiana**, Deputy Chief of Sector, RTC, Saint-Petersburg*

Members of Organizing Committee:

- ***Emelyanov Sergey**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Rector of Southwest State University, Kursk town*
- ***Ermolov Ivan**, Doctor of Technical Sciences, IPMech RAS, Moscow; academic secretary of RAS Academic Council on Robotics and Mechatronics; representative of European Association in Robotics (EURON)*
- ***Gorskaya Irina**, General Director, Association of State Scientific Centers of Russia «Nauka», Moscow*
- ***Gutenev Vladimir**, First Deputy Chairman of the Russian Engineering Union, First Deputy Chairman of the State Duma Committee on Economic Policy, Industry, Innovative Development and Entrepreneurship*
- ***Ivanov Alexander**, Chief of Scientific-Industrial Complex of RTC, Saint-Petersburg*
- ***Katenev Vladimir**, Chairman of the Board St. Petersburg Commerce and Industry Chambers*
- ***Kondratyev Alexander**, Candidate of Technical Sciences, Deputy Director of RTC, Saint-Petersburg*
- ***Kudzh Stanislav**, Doctor of Technical Sciences, Rector of Moscow Technological University*
- ***Lobin Mikhail**, General director of executive directorate, first vice-president of Union of Industrialists and Entrepreneurs of Saint Petersburg*
- ***Meyksin Marsim**, Chairman of Committee for industrial policy and innovations of Saint-Petersburg*
- ***Mikhailov Boris**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor in Baumann State Technical University, Moscow*
- ***Rudskoy Andrey**, Academician of the Russian Academy of Science, Rector of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*
- ***Uemura Kensuke**, Doctor, Director of ITAC Ltd., Japan*
- ***Yudin Victor**, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Deputy Chief Designer of RTC, Saint-Petersburg*

ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ / PLENARY SESSION 17

S.G. Tsarichenko, S.E. Simanov, I.M. Sidorov DIRECTIONS OF THE GROUND ROBOTIC SYSTEMS TEST DEVELOPMENT IN CONSIDERATION OF APPLICATION SPECIFIC CHARACTER IN NONDETERMINISTIC ENVIRONMENT 17

С.Г. Цариченко, С.Е. Симанов, И.М. Сидоров НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ИСПЫТАНИЙ НАЗЕМНЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ С УЧЕТОМ СПЕЦИФИКИ ПРИМЕНЕНИЯ В НЕДЕТЕРМИНИРОВАННЫХ УСЛОВИЯХ 17

S.A.Polovko, A.V. Popov THE FUTURE USE OF HYBRID GROUPS OF SPECIAL PURPOSE MOBILE ROBOTS 25

С.А. Половко, А.В. Попов ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ГИБРИДНЫХ ГРУПП МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ 25

КОСМИЧЕСКАЯ РОБОТОТЕХНИКА/ SPACE ROBOTICS 34

M.V. Mikhaylyuk, E.V. Strashnov, A.A. Prilipko, B.I. Kryuchkov, V.M. Usov THE ON-BOARD SIMULATION AND TRAINING SYSTEM FOR PERFORMING MANIPULATOR'S ACTIONS IN THE SUPERVISORY CONTROL MODE AND BUILDING THE VISUAL FEEDBACK FOR COSMONAUTS 34

М.В. Михайлюк, Е.В. Страшнов, А.А. Прилипко, Б.И. Крючков, В.М. Усов БОРТОВОЙ ИМИТАЦИОННО-ТРЕНАЖЕРНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ОПЕРАЦИЙ МАНИПУЛЯТОРОМ В СУПЕРВИЗОРНОМ РЕЖИМЕ И ПОСТРОЕНИЯ ВИЗУАЛЬНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ ДЛЯ КОСМОНАВТА 34

I.G. Sokhin, A.A. Kuritsyn PROBLEMS OF INTERACTION OF CREWS WITH ANTHROPOMORPHOUS ROBOTIC ASSISTANTS IN FUTURE SPACE MISSIONS 44

И.Г. Сохин, А.А. Курицын ПРОБЛЕМЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭКИПАЖЕЙ ПЕРСПЕКТИВНЫХ КОСМИЧЕСКИХ МИССИЙ С АНТРОПОМОРФНЫМИ РОБОТАМИ-ПОМОЩНИКАМИ 45

P.P. Belonozhko SYNTHESIS OF PROGRAM MOVEMENTS OF THE ROBOTIZED SPACE MODULE WITH THE ACCOUNT OF OWN DYNAMICS OF THE REDUCED SYSTEM 51

П.П. Белоножко СИНТЕЗ ПРОГРАММНЫХ ДВИЖЕНИЙ РОБОТИЗИРОВАННОГО КОСМИЧЕСКОГО МОДУЛЯ С УЧЕТОМ СОБСТВЕННОЙ ДИНАМИКИ ПРИВЕДЕННОЙ СИСТЕМЫ 51

V.M. Kopylov, I.Yu. Dalyaev CONTROL AND SHEDULING METHODS FOR SERVICING SPACECRAFT EQUIPPED WITH MANIPULATORS 59

В.М. Копылов, И.Ю. Даляев МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ И ПЛАНИРОВАНИЯ РАБОТЫ СЕРВИСНОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА, ОСНАЩЕННОГО МАНИПУЛЯТОРАМИ 59

F.B. Tebueva, V.I. Petrenko, V.O. Antonov, M.M. Gurchinsky, N.Yu. Svistunov A METHOD OF DETERMINING THE MUTUAL POSITION OF OPERATOR'S ARM JOINTS FOR ANTHROPOMORPHIC SPACE MANIPULATOR CONTROL 69

Ф.Б. Тебуева, В.И. Петренко, В.О. Антонов, М.М. Гурчинский, Н.Ю. Свистунов МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЗАИМОПОЛОЖЕНИЯ СУСТАВОВ РУКИ ОПЕРАТОРА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ АНТРОПОМОРФНЫМ КОСМИЧЕСКИМ МАНИПУЛЯТОРОМ 69

A.V. Safonov, A.N. Yusupov, A.V. Lopota AN ALGORITHM FOR AUTO TUNING OF DIGITAL CONTROLLERS FOR MECHATRONIC MODULES WITH SPACE APPLICATIONS 81

А.В. Сафонов, А.Н. Юсупов, А.В. Лопота АЛГОРИТМ САМОНАСТРОЙКИ ЦИФРОВЫХ РЕГУЛЯТОРОВ ДЛЯ МЕХАТРОННЫХ МОДУЛЕЙ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ 81

A.V. Ivanov, V.M. Rulevskiy, N.N. Tsebenko SISTEM OF CONTROL AND MANAGEMENT FOR COSMOBOT BATTERY 90

А.В. Иванов, В.М. Рулевский, Н.Н. Цебенко СИСТЕМА КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕИ КОСМОРОБОТА 90

K.A. Volnyakov INFLUENCE OF LUBRICANTS IN ZONE OF CONTACT OF SURFACES 96

К.А. Волняков ВЛИЯНИЕ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ В ЗОНЕ КОНТАКТА ПОВЕРХНОСТЕЙ 96

КОММЕРЦИАЛИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЙ РОБОТОТЕХНИКИ / COMMERCIALIZATION OF ROBOTICS TECHNOLOGIES 107

A.S.Yuschenko STATE OF ART AND PERSPECTIVES OF COLLABORATIVE ROBOTICS 107

А.С. Ющенко СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ КОЛЛАБОРАТИВНОЙ РОБОТОТЕХНИКИ 107

I.V. Voinov, A.M. Kazantsev, B.A. Morozov, M.V. Nosikov RADIATION-PROOF MANIPULATORS AND METHODS FOR EXTENDING THEIR FUNCTIONALITY 113

И.В. Войнов, А.М. Казанцев, Б.А. Морозов, М.В. Носиков РАДИАЦИОННО-СТОЙКИЕ МАНИПУЛЯТОРЫ И МЕТОДЫ РАСШИРЕНИЯ ИХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ 114

V.K. Abrosimov, V.V. Eliseev INTELLECTUAL ROBOT FOR PRECISIONAL AGRICULTURE 125

В.К. Абросимов, В.В. Елисеев ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ АГРОРОБОТ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ТОЧНОГО ЗЕМЛЕДЕЛИЯ 125

S.M. Shpolyanskiy, A.Y. Sedov CONSTRUCTIVE FEATURES OF THE THROWABLE CRAWLER ROBOTIC PLATFORMS 131

С.М. Шполянский, А.Ю. Седов КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ЗАБРАСЫВАЕМЫХ ГУСЕНИЧНЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ ПЛАТФОРМ 131

A.N. Vlasenko, A.Y. Ivasheva, O.E. Lapin, V.G. Mikutsky, P.V. Semenikhin SYSTEM FOR AUTONOMOUS RADIATION MONITORING AROUND NUCLEAR POWER PLANT 139

А.Н. Власенко, А.Ю. Ивашева, О.Е. Лапин, В.Г. Микуцкий, П.В. Семенихин СИСТЕМА ДЛЯ АВТОНОМНОГО МОНИТОРИНГА РАДИАЦИОННОЙ ОБСТАНОВКИ ВОКРУГ АТОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ 139

E.S. Briskin, Ya.V. Kalinin, M.V. Miroshkina WAYS OF MINIMIZE ENERGY COSTS FOR THE WALKING ROBOTS MOVEMENT AT ITS DISPLACEMENT ALONG A COMPLEX PROFILE 148

Е.С. Брискин, Я.В. Калинин, М.В. Мирошкина ПУТИ МИНИМИЗАЦИИ ЭНЕРГОЗАТРАТ НА ПЕРЕМЕЩЕНИЕ ШАГАЮЩЕГО РОБОТА ПРИ ЕГО ДВИЖЕНИИ ПО СЛОЖНОМУ ПРОФИЛЮ 148

A.V. Zuev, V.F. Filaretov, A.N. Zhirabok DEVELOPMENT AND RESEARCH OF THE SYSTEM OF TYPICAL FAULT DIAGNOSIS IN ELECTRIC DRIVES OF MANIPULATORS 152

А.В. Зуев, В.Ф. Филаретов, А.Н. Жирабок РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ТИПОВЫХ ДЕФЕКТОВ В ЭЛЕКТРОПРИВОДАХ МАНИПУЛЯТОРОВ 152

V.L. Afonin, A.N. Smolentsev, M.G. Yakovlev INTELLIGENT ROBOTIC COMPLEX FOR FINISHING COMPLEX SURFACES 161

В.Л. Афонин, А.Н. Смоленцев, М.Г. Яковлев ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ ДЛЯ ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКИ СЛОЖНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ 161

A.D. Kulichenko, E.U. Smirnova POSSIBLE APPLICATION OF HETEROGENEOUS ROBOT GROUP TO SEARCH AND LOCALIZATION OF IONIZING RADIATION SOURCES 171

А.Д. Куличенко, Е.Ю. Смирнова ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ ГЕТЕРОГЕННОЙ ГРУППЫ РОБОТОВ ДЛЯ ПОИСКА И ЛОКАЛИЗАЦИИ ИСТОЧНИКОВ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ 171

V.I. Syryamkin, V.I. Gutsul, I.S. Firsov, M.V. Syryamkin DEVELOPMENT OF THE CATERPILLAR ROBOT FOR ENVIRONMENTAL MONITORING 180

В.И. Сырямкин, В.И. Гуцул, И.С. Фирсов, М.В. Сырямкин РАЗРАБОТКА РОБОТА НА ГУСЕНИЧНОМ ХОДУ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ 180

D.A. Gromoshinskii, A.M. Zhukov, A.V. Popov, E.Yu. Smirnova PROVIDING SAFE GROUND SAMPLING INSIDE THE WORKING ZONE OF A MANIPULATOR WITH COMPUTER VISION 185

Д.А. Громошинский, А.М. Жуков, А.В. Попов, Е.Ю. Смирнова ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОГО ЗАБОРА ПРОБЫ ГРУНТА В РАБОЧЕЙ ЗОНЕ МАНИПУЛЯТОРА С ПОМОЩЬЮ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ 186

E.P. Grach, N.I. Filippov APPLICATION OF VL53L0X LASER DISTANCE SENSORS IN OBJECT DETECTION SYSTEMS 194

Е.П. Грач, Н.И. Филиппов ПРИЕНЕНИЕ ЛАЗЕРНЫХ ДАТЧИКОВ РАССТОЯНИЯ VL53L0X В СИСТЕМАХ ОБНАРУЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ 199

S.D. Likhonosov, N.A. Protsenko, V.P. Kulyga, A.N. Petrov, I.V. Gorbacheva, S.I. Shchekoldin AUTONOMOUS POWER SOURCES OF PJSC "SATURN" AND THEIR APPLICATION IN ROBOTIC SYSTEMS 204

С.Д. Лихоносов, Н.А. Проценко, В.П. Кулыга, А.Н. Петров, И.В. Горбачева, С.И. Щеколдин АВТОНОМНЫЕ ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ ПАО «САТУРН» И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ. 204

D.A. Kapustin, D.M. Korolev, O.A. Shmakov, A.V. Lopota POWER SUPPLY AND CONTROL SYSTEMS DESIGN FOR MOBILE ROBOTIC PLATFORMS 215

Д.А. Капустин, Д.М. Королев, О.А. Шмаков, А.В. Лопота РАЗРАБОТКА АРХИТЕКТУРЫ СИСТЕМЫ ПИТАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНОЙ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ ПЛАТФОРМЫ 215

V.G. Antcev APPLICATION OF UNMANNED ROBOT-BASEDAERIAL SYSTEMS DEVELOPED BY RADAR MMS COMPANY TO SOLVE GEOPHYSICAL, LOGISTICAL AND ENVIRONMENTAL TASKS 223

В.Г. Анцев ПРИМЕНЕНИЕ РОБОТИЗИРОВАННЫХ БЕСПИЛОТНЫХ АВИАЦИОННЫХ СИСТЕМ ПРОИЗВОДСТВА АО «НПП РАДАР ММС» ДЛЯ РЕШЕНИЯ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ, ЛОГИСТИЧЕСКИХ И ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ 223

A.G. Netkachev, D.N. Bychkovskii, A.L. Korotkov METHODS FOR INCREASING THE PERFORMANCE OF THE MACHINE FOR LAYER-BY-LAYER CREATING OF POLYMERIC-SAND MOLDS 229

А.Г. Неткачев, Д.Н. Бычковский, А.Л. Коротков ПОИСК СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ УСТАНОВКИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ПЕСЧАНО-ПОЛИМЕРНЫХ ФОРМ МЕТОДОМ ПОСЛОЙНОГО СИНТЕЗА 229

T.A. Baidina, S.F. Burdakov, O.B. Shagniev, I.K. Shanshin THE CONTROL OF VIBRATION IN CONTACT INTERACTION BETWEEN ROBOT AND SURFACE 235

Т.А. Байдина, С.Ф. Бурдаков, О.Б. Шагниев, И.К. Шаньшин УПРАВЛЕНИЕ ВИБРАЦИЯМИ ПРИ КОНТАКТЕ РОБОТА С ПОВЕРХНОСТЬЮ 236

I.E. Novikov STUDY OF THE POSSIBILITIES OF THE EARTH'S SURFACE AERIAL RADIATION MONITORING EFFICIENCY INCREASING 242

И.Э. Новиков ИЗУЧЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКОГО АВИАЦИОННОГО РАДИАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ 242

МОДЕЛИРОВАНИЕ РТК / MODELING OF ROBOTIC COMPLEXES 258

V.V. Arykantsev, A.A. Goncharov, V.V. Chernyshev MODELING OF CONTACT INTERACTION OF WALKING MOVER SUPPORT ELEMENTS (FEET) WITH THE GROUND UNDER CONDITIONS OF COMPLEX LOADING 258

В.В. Арыканцев, А.А. Гончаров, В.В. Чернышев МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ОПОРНЫХ Э ЛЕМЕНТОВ (СТОП) ШАГАЮЩЕГО ДВИЖИТЕЛЯ С ГРУНТОМ В УСЛОВИЯХ СЛОЖНОГО НАГРУЖЕНИЯ 258

V.M. Bitny-Shlyakhto, I.A. Vasilyev DEVELOPMENT OF THE PRINCIPLES OF INVESTIGATION AND CARTOGRAPHY OF THE WORKING ZONE OF ROBOTS 266

В.М. Битный-Шляхто, И.А. Васильев РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПОВ ОБСЛЕДОВАНИЯ И КАРТОГРАФИРОВАНИЯ РАБОЧЕЙ ЗОНЫ РОБОТОВ 266

O.P. Goidin, I.L. Ermolov, S.A Sobolnikov ROBSIM SOFTWARE FOR MOBILE ROBOTS MODELING 272

О.П. Гойдин, И.Л. Ермолов, С.А. Собольников ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ROBSIM ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ 272

I.L. Ermolov, S.P. Khripunov ISSUES OF GROUP-BASED USAGE OF UNMANNED VEHICLES 279

И.Л. Ермолов, С.П. Хрипунов ПРОБЛЕМЫ ГРУППОВОГО ПРИМЕНЕНИЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ 279

O.M. Kapustina MANIPULABILITY AND MOTION PLANNING OF ROBOT KUKA YOUBOT 286

О.М. Капустина МАНИПУЛЯТИВНОСТЬ РОБОТА KUKA YOUBOT И ПЛАНИРОВАНИЕ ЕГО ДВИЖЕНИЙ 293

A.N. Mozhaev SEGMENTATION OF POINT CLOUDS BY MEANS OF POINT CLOUD LIBRARY 301

А.Н. Можаев СЕГМЕНТАЦИЯ ОБЛАКОВ ТОЧЕК С ПОМОЩЬЮ СРЕДСТВ БИБЛИОТЕКИ POINT CLOUD LIBRARY 301

L.Yu. Vorochaeva, A.V. Malchikov, A.A. Postol'niy APPROACHES TO DESIGNING WHEELED JUMPING ROBOT 308

Л.Ю. Ворочаева, А.В. Мальчиков, А.А. Постольный ПОДХОДЫ К ПРОЕКТИРОВАНИЮ КОЛЕСНОГО ПРЫГАЮЩЕГО РОБОТА 308

A.A. Vlasenko, A.L. Korotkov THE MANIPULATOR DESIGN PRINCIPLES BASED ON MULTI TURN JOINTS FOR A SMALL ROBOTIC PLATFORM WITH QUICK EQUIPMENT REPLACEMENT 317

А.А. Власенко, А.Л. Коротков ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ МАНИПУЛЯТОРА НА ОСНОВЕ ПОЛНООБОРОТНЫХ ШАРНИРОВ ДЛЯ МАЛОГАБАРИТНОЙ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ ПЛАТФОРМЫ, С ВОЗМОЖНОСТЬЮ ОПЕРАТИВНОЙ ЗАМЕНЫ НАВЕСНОГО ОБОРУДОВАНИЯ 317

A.S. Gubankov, D.A. Yukhimets IDENTIFICATION METHOD OF KINEMATIC PARAMETERS OF MULTILIK INDUSTRIAL MANIPULATOR 325

А.С. Губанков, Д.А. Юхимец МЕТОД ИДЕНТИФИКАЦИИ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МНОГОЗВЕННОГО ПРОМЫШЛЕННОГО МАНИПУЛЯТОРА 325

V.E. Pavlovsky, D.A. Gribkov, I.A. Orlov, A.V. Podoprosvetov, E.Yu. Kolesnichenko MOBILE MANIPULATOR ON SIX-WHEEL MECANUM PLATFORM 335

В.Е. Павловский, Д.А. Грибков, И.А. Орлов, А.В. Подопросветов, Е.Ю. Колесниченко МОБИЛЬНЫЙ МАНИПУЛЯТОР НА ШЕСТИКОЛЕСНОЙ МЕКАНУМ-ПЛАТФОРМЕ 335

E.S. Briskin, K.Yu. Lepetukhin, A.V. Maloletov, V.A. Serov, A.P. Kirillov ON THE MOTION CONTROL OF A ROBOTIC MULTI-SECTION CENTER-PIVOT IRRIGATION MACHINE FOR PROCESSING NON-CIRCULAR FIELDS 344

Е.С. Брискин, К.Ю. Лепетухин, А.В. Малолетов, В.А. Серов, А.П. Кириллов ОБ УПРАВЛЕНИИ ДВИЖЕНИЕМ РОБОТИЗИРОВАННОЙ МНОГОЗВЕННОЙ ДОЖДЕВАЛЬНОЙ МАШИНЫ ДЛЯ ОРОШЕНИЯ ПОЛЕЙ НЕКРУГЛОЙ ФОРМЫ 344

M.A. Nogin, A.L. Korotkov, A.V. Rogov, O.A. Shmakov, A.V. Lopota RTC PROVING GROUND FOR MOBILE ROBOTIC COMPLEXES 352

М.А. Ногин, А.Л. Коротков, А.В. Рогов, О.А. Шмаков, А.В. Лопота ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ ПОЛИГОН ЦНИИ РТК ДЛЯ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ 352

D.D. Lipovskiy, Yu.A. Denisenya, A.V. Vasilev SPECIAL REQUIREMENTS TO ROBOTIC COMPLEXES OF MILITARY UNITS OF RADIOLOGICAL, CHEMICAL AND BIOLOGICAL DEFENSE 361

Д.Д. Липовский, Ю.А. Денисеня, А.В. Васильев СПЕЦИАЛЬНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К РОБОТОТЕХНИЧЕСКИМ КОМПЛЕКСАМ ВОЙСК РАДИАЦИОННОЙ, ХИМИЧЕСКОЙ И БИОЛОГИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ 361

A.V. Lekareva, A.A. Kobzev, A.A. Mahfouz FEATURES OF CONSTRUCTING A MOBILE ROBOTIC COMPLEX OF WATERJET CUTTING OF OIL PIPELINES 367

А.В. Лекарева, А.А. Кобзев, А.А. Махфуз ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ МОБИЛЬНОГО РТК ГИДРОАБРАЗИВНОЙ РЕЗКИ ТРУБ НЕФТЕПРОВОДОВ 367

M.B. Ignatiev NETWORK-CENTRIC CONTROL OF A GROUP OF COMPETING ROBOTS 377

М.Б. Игнатьев СЕТЕЦЕНТРИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ГРУППОЙ КОНКУРИРУЮЩИХ РОБОТОВ..... 377

M.B. Ignatyev SYSTEM ANALYSIS OF THE PROBLEMS OF MOVING THROUGH THE SPACES OF THE ARCTIC AND ANTARCTIC 378

М.Б. Игнатьев СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ПРОБЛЕМ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ПО ПРОСТРАНСТВАМ АРКТИКИ И АНТАРКТИКИ 378

ТЕХНОЛОГИИ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА / ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNOLOGIES 380

I.A. Bugakov MINIMALITY AND CATEGORIZATION PRINCIPLE IN NATURAL AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE 380

И.А. Бугаков ПРИНЦИП МИНИМАЛЬНОСТИ И КАТЕГОРИЗАЦИЯ В ЕСТЕСТВЕННОМ И ИСКУССТВЕННОМ ИНТЕЛЛЕКТЕ 380

E.A. Abrosimov APPLICATION OF THE FUZZY LOGIC FOR MOBILE ROBOT NAVIGATION IN POORLY DESCRIBED ENVIROMENT 385

Э.А. Абросимов ПРИМЕНЕНИЕ НЕЧЁТКОЙ ЛОГИКИ ДЛЯ НАВИГАЦИИ МОБИЛЬНОГО РОБОТА В ПЛОХО ФОРМАЛИЗУЕМОЙ СРЕДЕ 385

A.S. Antonov, D.O. Makarov, B.B. Mikhailov USING OF INTELLIGENT SENSOR IN A TECHNICAL VISION SYSTEM TO CONTROL PARTS ON A CONVEYOR BELT 392

А.С. Антонов, Д.О. Макаров, Б.Б. Михайлов ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ДАТЧИКА В СИСТЕМЕ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ДЕТАЛЕЙ НА КОНВЕЙЕРЕ 392

A.V. Bakhshiev, S.R. Orlova, A. Komarov, D.N. Stepanov CLASSIFICATION OF SCENARIOS AND ALGORITHMS IN TECHNICAL VISION SYSTEMS OF UNMANNED GROUND VEHICLES 400

А.В. Бахшиев, С.Р. Орлова, А. Комаров, Д.Н. Степанов КЛАССИФИКАЦИЯ СЦЕНАРИЕВ И АЛГОРИТМОВ В СИСТЕМАХ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ 400

A.V. Grivachev, V.O. Avdeev, V.V. Varganov, E.A. Titenko THE MODIFIED METHOD OF HIERARCHICAL ANALYSIS OF FOR THE SELECTION OF MOBILE ROBOTECHNICAL COMPLEXES 409

А.В. Гривачев, В.О. Авдеев, В.В. Варганов, Е.А. Титенко МОДИФИЦИРОВАННЫЙ МЕТОД АНАЛИЗА ИЕРАРХИЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ НАЗЕМНЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ 410

K.I. Kiy IMAGE UNDERSTANDING SYSTEMS BASED ON THE GEOMETRIZED HISTOGRAMS METHOD 417

К.И. Кий СИСТЕМЫ ПОНИМАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ, ОСНОВАННЫЕ НА МЕТОДЕ ГЕОМЕТРИЗОВАННЫХ ГИСТОГРАММ 417

E.B. Mustafina PROSPECTS FOR APPLICATION OF GENERATIVE ADVERSARIAL NETWORKS IN ROBOTICS 424

Э.Б. Мустафина ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ГЕНЕРАТИВНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В РОБОТОТЕХНИКЕ 424

I.S. Ozhmegov, R.R. Khazanskii COMPRESSION OF STREAMING VIDEO FROM A GROUND ROBOT'S CAMERA FOR COMMUNICATION CHANNELS WITH LOW BANDWIDTH 432

И.С. Ожмегов, Р.Р. Хазанский СЖАТИЕ ПОТОКОВОГО ВИДЕО С КАМЕРЫ НАЗЕМНОГО РОБОТА ДЛЯ КАНАЛОВ СВЯЗИ С НИЗКОЙ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТЬЮ 432

V.V. Varlashin, M.A. Ershova, V.A. Bunyakov, O.A. Shmakov CIRCULAR REVIEW SYSTEM WITH AUGMENTED REALITY FOR MOBILE ROBOTS CONTROL 442

В.В. Варлашин, М.А. Ершова, В.А. Буняков, О.А. Шмаков СИСТЕМА КРУГОВОГО ОБЗОРА С ТЕХНОЛОГИЕЙ ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНЫМИ РОБОТАМИ 442

S.R. Orlova, A.V. Bakhshiev ROAD SIGN RECOGNITION USING DEEP NEURAL NETWORKS 451

С.Р. Орлова, А.В. Бахшиев РАСПОЗНАВАНИЕ ДОРОЖНЫХ ЗНАКОВ НА БАЗЕ ГЛУБОКИХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ 451

M.D. Tuv, R.R. Khazanskii THE DEVELOPMENT OF THE COMMUNICATION PROTOCOL LIBRARY FOR MECHATRONIC DEVICES 460

М.Д. Тув, Р.Р. Хазанский РАЗРАБОТКА БИБЛИОТЕКИ КОММУНИКАЦИОННОГО ПРОТОКОЛА ДЛЯ МЕХАТРОННЫХ УСТРОЙСТВ 460

A.G. Kurochkin, P.V. Lotorev, V.V. Varganov, E.A. Titenko THE SCHEME OF THE DATA INTEGRATION FOR THE CONTROL SYSTEM OF THE MOBILE ROBOT 465

А.Г. Курочкин, П.В. Лоторев, В.В. Варганов, Е.А. Титенко СХЕМА КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ ДАННЫХ ДЛЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНЫМ РОБОТОМ 465

M.B. Ignatiev, A.V. Korshunov, R.V. Kleimenov, O.O. Zharinov, V.A. Nenashev, J.A. Lipinski, P.I. Makin PROBLEMS IN THE DEVELOPMENT AND USE OF AUTONOMOUS ROBOTS FOR DIAGNOSTICS OF GAS PIPELINES 472

М.Б. Игнатьев, А.В. Коршунов, Р.В. Клейменов, О.О. Жаринов, В.А. Ненашев, Я.А. Липинский, П.И. Макин ПРОБЛЕМЫ РАЗРАБОТКИ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АВТОНОМНЫХ РОБОТОВ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ГАЗОПРОВОДОВ 475

A.V. Vasiliev DEVELOPMENT AND STUDY OF THE COMPLETE COMPUTER MODEL OF SMALL-SIZED MOBILE ROBOT TRANSPORT SYSTEM WITH RECONFIGURABLE CHASSIS 476

А.В. Васильев ПОСТРОЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛНОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ МАЛОГАБАРИТНОГО МОБИЛЬНОГО РОБОТА С РЕКОНФИГУРИРУЕМЫМ ШАССИ 477

S.Kh. Zabikhifar, A.S. Yuschenko ADAPTIVE NEURAL NETWORK CONTROL SYSTEM OF THE MANIPULATOR 485

С.Х. Забихифар, А.С.Ющенко АДАПТИВНАЯ НЕЙРОСЕТЕВАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ МАНИПУЛЯТОРОМ 485

МЕДИЦИНСКАЯ РОБОТОТЕХНИКА. ПЕРФУЗИОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ ДЛЯ ТРАНСПЛАНТАЦИИ И РЕАНИМАЦИИ / ROBOTICS IN MEDICINE. PERFUSION COMPLEXES FOR TRANSPLANTATION AND RESUSCITATION 492

V.V. Uyba MAIN DIRECTIONS OF WORKS ON CREATION OF MEDICAL ROBOTIC SYSTEMS OF NEW GENERATION 492

В.В. Уйба ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАБОТ ПО СОЗДАНИЮ МЕДИЦИНСКИХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ 492

V.F. Golovin, M.V. Arhipov, L.B. Kocherevskaya ROBOTICS FOR INCREASING MILITARY CAPACITY 497

В.Ф. Головин, М.В. Архипов, Л.Б. Кочеревская РОБОТОТЕХНИКА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ БОЕСПОСОБНОСТИ ВОЕННОСЛУЖАЩИХ 497

ТЕХНОЛОГИИ МОРСКОЙ РОБОТОТЕХНИКИ / MARINE ROBOTICS TECHNOLOGIES 504

B.A. Luskin, D.O. Semenov, A.I. Zakharov DEVELOPMENT (DESIGNING) OF ROBOTIC COMPLEXES IN CDB ME “RUBIN” 504

Д.О. Семенов, А.И. Захаров, Б.А. Лускин ПРОЕКТИРОВАНИЕ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ В ЦКБ МТ «РУБИН» 504

V.K. Abrosimov, A.N. Mochalkin, E.I. Tatarenko MARINE ROBOTIZED COMPLEX FOR SOLVING PROBLEMS IN SITUATIONAL AWARENESS 509

В.К. Абросимов, А.Н. Мочалкин, Е.И.Татаренко МОРСКОЙ РОБОТИЗИРОВАННЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ СИТУАЦИОННОЙ ОСВЕДОМЛЕННОСТИ В АКВАТОРИЯХ 509

D.A. Gromoshinskii, A.V. Popov DETECTING METAL-CONTAINING OBJECTS WITH FERROMAGNETIC SENSORS MOUNTED ON UNMANNED UNDERWATER VEHICLE 513

Д.А. Громошинский А.В. Попов ОБНАРУЖЕНИЕ МЕТАЛЛОСОДЕРЖАЩИХ ОБЪЕКТОВ С ПОМОЩЬЮ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ЗОНДОВ, УСТАНОВЛЕННЫХ НА НЕОБИТАЕМОМ ПОДВОДНОМ АППАРАТЕ 513

N.A. Shchur, D.A. Vokhmintcev AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLES HYDRODYNAMIC INSTABILITY 525

Н.А. Щур, Д.А. Вохминцев ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ АВТОНОМНОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА 525

V.A .Shurygin, V.A. Serov, I.V. Kovshov, S.A. Ustinov THE DEVELOPMENT AND ENSURING THE EXPLOITATIONS OF THE ARCTIC OFFSHORE HYDROCARBONS FIELDS BY USING THE ROBOTIZED LEGGED PLATFORMS 530

В.А. Шурыгин, В.А. Серов, И.В. Ковшов, С.А. Устинов ОБУСТРОЙСТВО И ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПОДВОДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УГЛЕВОДОРОДОВ АРКТИЧЕСКОГО ШЕЛЬФА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РОБОТИЗИРОВАННЫХ ШАГАЮЩИХ ПЛАТФОРМ 530

S.G. Tsarichenko, S.E. Simanov, I.M. Sidorov

DIRECTIONS OF THE GROUND ROBOTIC SYSTEMS TEST DEVELOPMENT IN CONSIDERATION OF APPLICATION SPECIFIC CHARACTER IN NONDETERMINISTIC ENVIRONMENT

NII GEODEZIJA, Krasnoarmeisk, Moscow region
tsarichenko_s@mail.ru

С.Г. Цариченко, С.Е. Симанов, И.М. Сидоров

НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ИСПЫТАНИЙ НАЗЕМНЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ С УЧЕТОМ СПЕЦИФИКИ ПРИМЕНЕНИЯ В НЕДЕТЕРМИНИРОВАННЫХ УСЛОВИЯХ

ФКП «НИИ «Геодезия», г. Красноармейск
tsarichenko_s@mail.ru

Аннотация

В работе рассматривается вопрос определения особенностей эксплуатации наземных робототехнических комплексов в реальных условиях недетерминированной обстановки с целью разработки методов испытаний, учитывающих эти особенности. Сделана попытка выделить наиболее характерные особенности применения наземных робототехнических комплексов и сформулировать основные подходы к построению методологии с учётом имеющегося опыта и существующей экспериментально-испытательной базы.

Ключевые слова: наземный робототехнический комплекс, недетерминированные условия, испытания, помеховая обстановка, испытательный полигон.

Наземные робототехнические комплексы (НРТК), предназначенные для использования в недерминированных условиях представляют мобильные технологические системы, во многом совпадающие по своей конструкции с аналогичными экипажными машинами. Отличительной особенностью НРТК является наличие систем дистанционного, супервизорного или автономного управления, что определяет степень ответственности и надежности, предъявляемой к точности и адекватности формирования и выполнения команд управления. Наличие такой управляющей надстройки, в отличии от экипажных машин, во многом определяет особенность организации и проведения испытаний НРТК различного функционального назначения.

При организации проведения испытаний НРТК важное место отводится оценке работоспособности и адекватного технического функционирования собственных систем при сохранении заданных основных тактико-технических параметров, таких как скорость, возможность преодоления препятствий, грузоподъемность, дальность дистанционного управления, оценка работоспособности и производительности узлов полезной нагрузки и т.п. При этом, в существующих традиционных методиках испытаний мобильных изделий (средств и/или комплексов) практически не учитываются особенности функционирования НРТК, такие как контроль работоспособности систем, точность, адекватность и быстродействие их функционирования при оценке состояния окружающей среды, правильность принятия решений в условиях недетерминированной среды максимально приближенных к реальным. Очевидно, что система испытаний НРТК должна строиться на основе моделирования типовых тактических задач, которые им предстоит решать в ходе выполнения их миссии [1].

Основными отличительными особенностями НРТК от экипажных аналогов является наличие в их системе управления следующих функциональных подсистем: технического зрения, ориентации, связи

и блока принятия решения. Существующие в настоящее время методики, системы измерений и контроля, используемые при проведении испытаний экипажных машин, в случаи применения их для испытаний НРТК, не обеспечивают необходимого уровня безопасности. Отсутствие полной и достоверной информации о состоянии и режимах работы НРТК в задаваемых тестовых условиях не позволяет осуществлять валидацию численного моделирования его функционирования.

В связи с этим ставится задача сформулировать и разработать методический подход к проведению комплексных функциональных испытаний НРТК в условиях недетерминированной среды, с целью оценки работоспособности системы управления в целом при наложении многофакторных помех, что может инициировать синергизм отказов. Вопросы совершенствования имеющейся испытательной базы и создание на принципиально новом уровне процесса испытаний НРТК с использованием современных измерительных комплексов и методов моделирования различных видов помеховой обстановки, в том числе с использованием численных методов, оперативного построения карт местности для воспроизведения условий реальной действительности, базирующихся на условиях реальных испытательных полигонов, с использованием существующей их инфраструктуры, являются одними из первоочередных задач в вопросах организации процесса создания и внедрения в практическую деятельность НРТК.

Для решения этих задач в настоящее время выполняется ряд работ по формированию унифицированных методик проведения испытаний и перечня параметров, определяемых в процессе испытаний РТК, условия их проведения и виды обеспечения, разрабатываются предложения по перспективам развития полигонной испытательной базы с учетом специфики функционирования НРТК различного назначения. В частности, в работе [2] были рассмотрены вопросы организации проведения испытаний боевых робототехнических комплексов, в части захвата и поражения целей автономными системами. Однако, в настоящее время, отсутствует полное понимание специфики по организации и проведении этих испытаний, составу испытательного оборудования, необходимых технических решений нормативной базы, учитывающих специфику этих работ. Учитывая сложившуюся ситуацию, предлагается рассмотреть ряд требований по оценке надежности и эффективности работы НРТК, определяющих специфику функционирования этих машин в отличие от экипажных аналогов. В качестве дополнительных параметров, подлежащих контролю и оценке при проведении испытаний НРТК, предлагается рассмотреть следующие требования:

– безопасное прохождение и точность следования НРТК заданного маршрута;

– автономная навигация;

– возможность возвращения на исходный рубеж в автономном режиме при потере управления;

– возможность адаптации, реагирования и принятие решения к изменению окружающих факторов;

– определение правильности обнаружения, идентификации объекта внимания с целью сопровождения;

– оценка эффективности системы принятия решений в аварийных ситуациях и сохранения работоспособности НРТК при выходе из строя одной из подсистем управления (СТЗ, канал управления, блока навигации и т.п.).

Требования обеспечения безопасного прохождения и точности следования испытуемым образцом НРТК заданного маршрута являются одними из основных, применительно к системам с дистанционным принципом управления. Тестирование должно быть проведено с исключительным использованием испытательных трасс, чтобы смягчить потенциальную угрозу безопасности персоналу, зданиям, и тестируемым образцам. Основное требование при проведении данного тестирования – это поддержание испытуемым НРТК заданной траектории движения с заданным допуском отклонения, обеспечивающем безопасность выполнения задания. В режиме дистанционного управления НРТК движется по пересеченной местности (рис.1) под непосредственным контролем оператора по заранее заданному маршруту тестовой трассы.

Рисунок 1 – Схема трассы испытаний безопасного прохождения и точности следования НРТК заданного маршрута: 1 – площадка предварительного осмотра; 2 – старт; 3,4 – скоростные участки с твердым покрытием; 5 – средства оптического контроля; 6 – площадка для БЛА; 7 – гравийный участок (20 м); 8 – песчаный участок (20 м); 9 – травяной участок (20 м); 10 – грунтовый участок скоростного маневрирования (100 м); 11 – подъем в 30º, 45º и 60º; 12 – спуск в 30º, 45º и 60º ; 13 – площадка полосы препятствий; 14 – туннель(закрытый участок трассы); 15 – участок водной преграды глубиной 10, 20 и 30 см; 16 – финиш; 17 – площадка осмотра после финиша; 18 – место оператора; 19 – фрагмент здания для поиска предметов; 20 - трибуны для наблюдателей

Предварительно определяется состояние радиопомеховой обстановки на трассе, с целью исключить ошибочные действия НРТК в результате нестабильного функционирования канала управления и телеметрии. Скорость движения должна соответствовать указанной в тактико-технических требованиях (ТТТ). Тестовая трасса представляет участок прямолинейного движения с твердым покрытием протяженностью 400 м и различными грунтами 160 м, участки криволинейного движения на полосе препятствий (рис. 2), спуски и подъемы. Состояние дорожного покрытия (твердое авсфальовое, грунтовое и т.п.) углы наклона при спуске и подъеме должны соответствовать указанным в ТТТ испытуемого образца. Ширина коридора безопасности (отклонение от заданной траектории движения в каждую сторону) не должно превышать 50% от ширины НРТК (рис. 3). Выход НРТК за пределы указанного коридора считается отрицательным результатом, причины которого должны быть проанализированы с учётом информации с бортовых измерительных устройств. В качестве системы определения местоположения машины на трассе используется устройство глобальной системы позиционирования (GPS, ГЛОНАСС) с максимально возможным разрешением. Контроль за правильностью прохождения трассы осуществляется системой оптического контроля, которое является средством объективного внешнего контроля полигона и предназначен для видео регистрации процесса проведения испытаний НРТК, определения в реальном времени параметров маневрирования объектов испытания (координат, ориентации, скорости и т.д.), оперативного выявления нештатного функционирования НРТК. Включает в свой состав: посты видеосъемки патрульного типа, посты видеосъемки следящего типа, посты видеосъёмки на БПЛА, аппаратуру передачи информации, аппаратуру видео регистрации и анализа на предмет выявления нештатных ситуаций, пост дистанционного контроля, управления и отображения оперативной информации, пост обработки и анализа полученной информации.

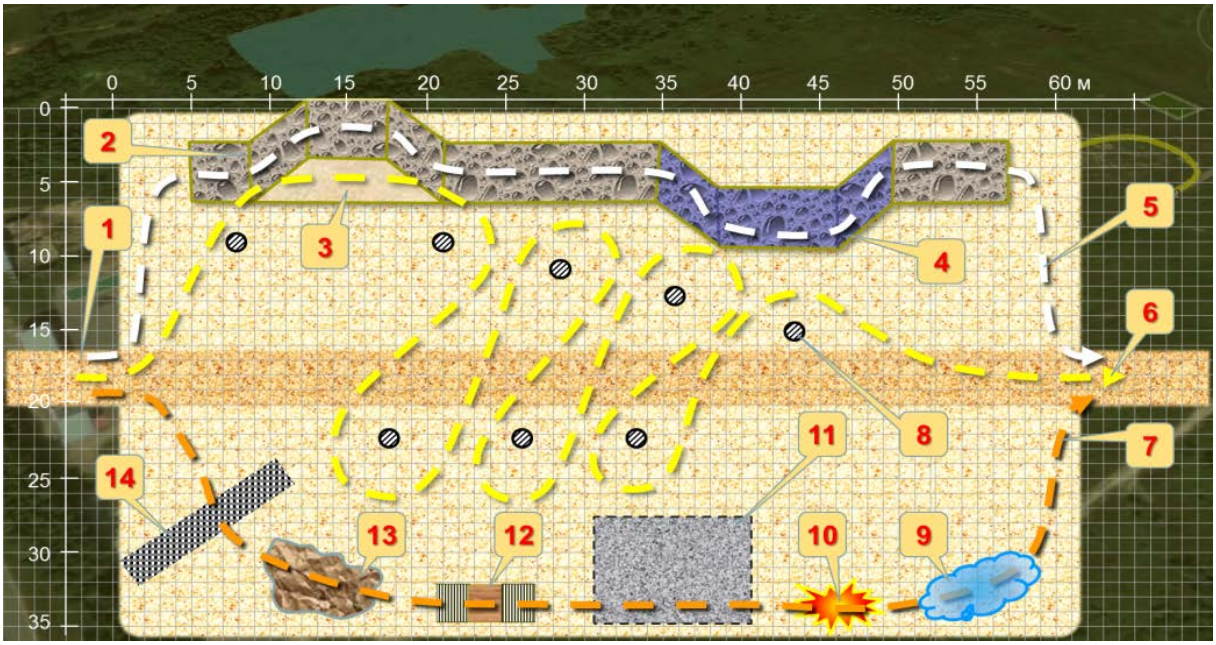


Рисунок 2 – Схема полосы препятствий: 1 – грунтовый участок основной трассы; 2 – каменная горка (горный перевал); 3 – каменный овраг; 4 – каменный овраг; 5 – трасса «горные условия»; 6 – трасса «маневрирование»; 7 – трасса «городские условия» ; 8 – указатели поворотов; 9 – «дождевой коридор»; 10 – «огненный коридор»; 11 – площадка испытаний полезной нагрузки; 12 – препятствие «мост»; 13 – препятствие «руины»; 14 – препятствие «железнодорожный переезд»

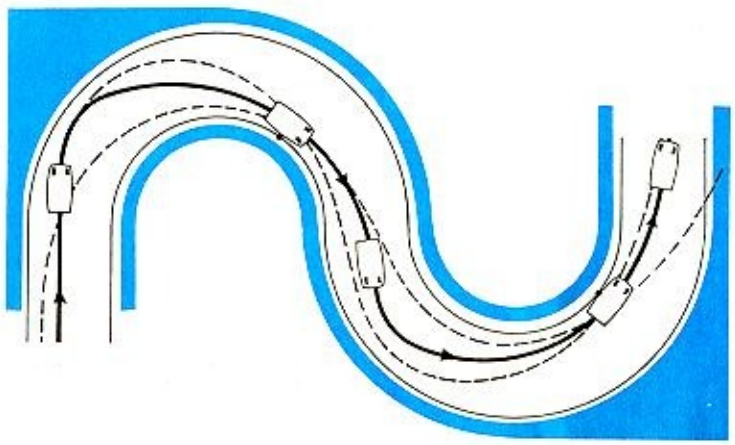


Рисунок 3 – Схема контроля движения НРТК в коридоре безопасности

Режимы автономной навигации НРТК предусматривают способность ориентироваться в пространстве, осуществлять выбор оптимального маршрута при выполнении полученного задания, следование по заданному маршруту, обнаружение и преодоление препятствий. Для реализации этих функций система управления должна на основании полученной информации о состоянии окружающей среды, данных о местоположении и полученного задания сформировать соответствующие команды на исполнительные органы и приводы. В качестве критериев, определяющих адекватность, правильность эффективность принятых решений в условиях полигонных испытаний предлагается использовать время и точность определения местоположения на основании данных глобальной системы позиционирования или обработки заданных электронных карт местности, правильность построения маршрута движения, и оценка точности следования заданной траектории. Примеры построения планируемой траектории и контроль за прохождением тестового участка, получаемые с помощью оптической системы контроля и глобальной системы позиционирования представлены на рис. 4.

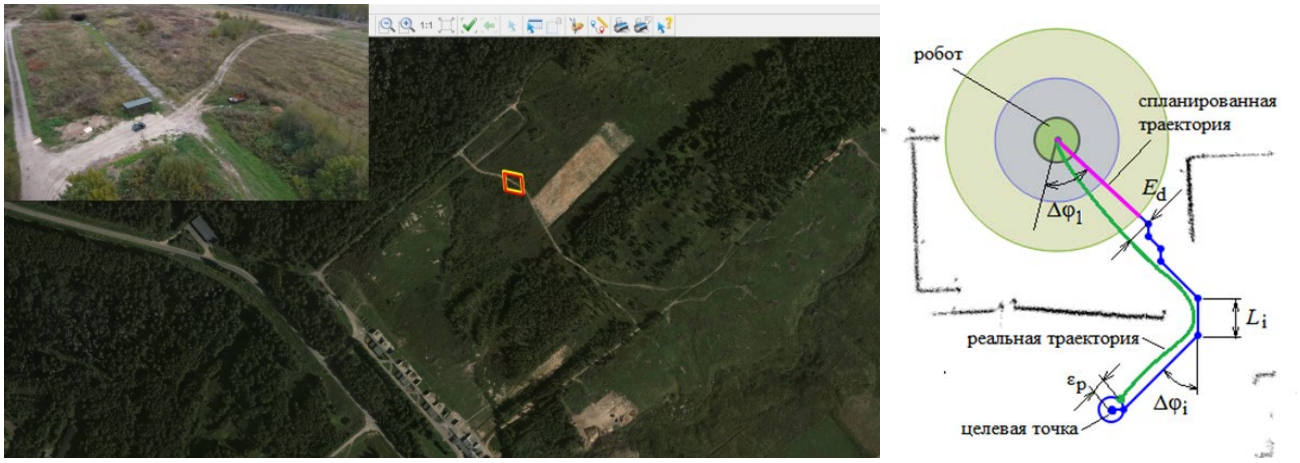


Рисунок 4 – Информация получаемая при проведении испытаний работоспособности системы автономной навигации НРТК

Одним из элементов системы автономного управления НРТК является подсистема автономного возвращения машины в случае потери управляющего радиосигнала либо на исходную точку, либо в зону устойчивого приёма радиосигнала управления. В ходе проведения испытаний функционирования данной подсистемы должна проверяться работоспособность системы обнаружения отказа радиоканала, принятия решения о возвращении и система навигации и управления движением при условии изменения обстановки на маршруте возвращения. Последнее требование предусматривает необходимость построение маршрута движения, аналогично как при выполнении основной миссии НРТК в автоматическом режиме движения). Для проведения испытаний по оценке возможности возвращения на исходный рубеж в автономном режиме при потере управления используется участок тестовой трассы, представленный рис.1. В процессе проведения испытания испытуемый образец НРТК выдвигается в наиболее удаленную точку от старта с использованием существующей системы управления (дистанционное, супервизорное), после чего моделируется потеря контакта управления в результате отключения радиоканала связи управления и телеметрии или в результате постановки радиопомех в зоне проведения испытаний. В результате система управления автономным движением НРТК должна быть активирована и объект испытаний должен начать движение в исходную точку (рис. 5). Для оценки работоспособности системы ориентации и принятия решений в недетерминированных условиях на маршруте первоначального движения устанавливается препятствие, препятствующее выполнить обратное движение по заранее отсканированному пути. Критерием положительного результата является возвращение испытуемого образца в точку старта с отклонением ±25 м.

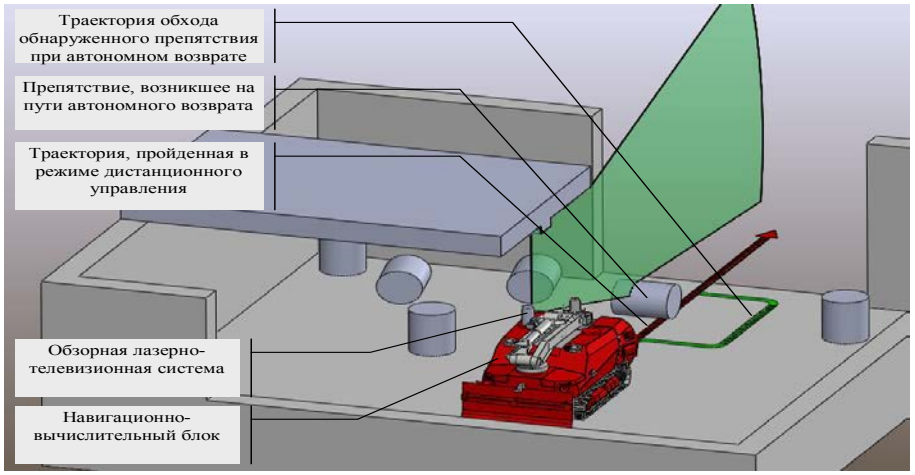


Рисунок 5 – Режим автономного возвращения НРТК в исходную точку при потере управления

Специфика функционирования НРТК в недетерминированных условиях обусловлена возможностью появления внешних динамических событий, обусловленных как природными явлениями (дождь, туман, солнечные блики и т.п.), так и действиями различных субъектов (движение транспорта, появление человека в зоне работ, появление конкурирующих объектов внимания и т.п), что обуславливает необходимость оперативной оценки изменившейся обстановки и адаптации к изменению окружающих факторов с целью принятия адекватного решения. Актуальность данной проблемы подтверждается имевшими место авариями с автомобилями с автономной системой безопасности компании UBER (рис. 6.)

Рисунок 6 – Дорожные инциденты с автомобилями с автономной системой управления

Особенность автономных средств – в их способности работать в недерминированных условиях окружающей среды. Примерами «воздействий» окружающей среды являются субъекты, принимающие свои решения в ответ на действия автономной системы; создается познавательная обратная связь, которая генерирует всплеск пространства состояний. Кроме этого, автономные решения могут обладать памятью, и пространство состояний не только очень сложно в текущей ситуации, но также и в разнообразии ситуаций в течение долгого времени. В настоящее время развертываемые системы имеют очень ограниченную робастность к динамическим, изменяющимся условиям окружающей среды. Адаптивные автономные алгоритмы обладают потенциалом преодоления существующей уязвимости автоматизированных систем в будущей, динамичной, сложной и/или конкурентной среде. Однако за это увеличение эффективности придется платить обеспечением правильного поведения в бесчисленном числе условий окружающей среды.

В связи с этим, учитывая многообразие внешних возмущающих факторов, предлагается в качестве тестового мероприятия по определению возможности системы человек-машина или автономной системы принятия решения к выработке необходимых команд и их реализации на начальном этапе моделирования принять следующие возможные сценарии динамических событий, реализация которых может быть осуществлена на различных участках тестовой трассы и полосе препятствий:

– появление неожиданного препятствия на пути следования;

– выбор альтернативного решения при возникновении двух и более разномасштабных препятствий (одновременное появление объектов внимания, степень последствий от инцидента с ними имеет разные последствия) ;

– потеря оптической прозрачности окружающей среды (туман, дым, грязь и т.п.);

– «ослепление» системы технического зрения внешним воздействием;

– воздействие внешним электромагнитным полем (грозовые разряды, промышленные установки).

Учитывая возможность появления одновременно нескольких дестабилизирующих событий (возмущающих факторов), целесообразно при проведении испытаний смоделировать условия их наложения в одном временном интервале, тем самым активировать синергизм отказа системы в целом. Воздействие указанных выше указанных возмущающих факторов не должно блокировать выполнение основной миссии НРТК, то есть прекращение движения или выполнение действий приводящих к тяжелым последствиям или аварии. Возможная временная задержка при возникновении одного из аварийного сценария не должна превышать 10 % от времени заданного для выполнения данного теста в безаварийных условиях.

Одной из важных задач НРТК является возможность обеспечивать движение в колоне или контролируя своё положение по отношению к лидеру, являющемуся объектом внимания. При этом важная роль отводится обнаружению, идентификации и сопровождению объекта внимания с целью недопущения потери контакта ним. Испытания должны проводиться на тестовой трассе при условиях нормальной видимости, на скоростях предусмотренных техническими требованиями к системе. При получении положительных результатов необходимо провести движение по данному маршруту при наличии выше указанных возмущающих факторов (дым, вспышки света и т.п.). При этом система технического зрения, работающая в мультиспектральном диапазоне, должна обеспечить распознавание и идентификацию объекта внимания (рис.7). Кроме того, при проведении данных тестов необходимо предусмотреть возможность появления ложного лидера, с целью увода тестируемого объекта от заданной траектории движения. Критерием положительного прохождения данного теста является сопровождение объекта внимания на всех участках без остановок, вызванных потерей контакта с лидером движения.

Рисунок 7 – Объект внимания, представленный в видимом и ИК диапазоне при наличии дымовой помехи

В качестве факторов недетерминированной обстановки, оказывающих воздействие на надежность и эффективность работы систем управления и НРТК в целом, должна быть рассмотрена ситуация выхода из строя одной из подсистем управления (СТЗ, канал управления, блока навигации и т.п.), которая должна реализовываться с помощью принудительного отключения одного из элементов систем с целью имитации их повреждения или неисправности. Основной целью данного вида испытаний является проверка адекватности принятия решения системами самодиагностики и безопасности функционирования комплекса, будь то система человек-машина или автономная система управления.

В этих условиях для регистрации протекающих процессов и обеспечения безопасности должна быть предусмотрена система сбора данных с целью самодиагностики и принятия решений в аварийных ситуациях. Для осуществления контроля за состоянием функционирования основных узлов и механизмов НРТК в ходе проведения испытаний был разработан опытный образец системы сбора и обработки данных, которые транслировались по отдельному независимому телеметрическому каналу на пульт испытателя. В качестве примера передачи контрольной информации о соответствии реального курсового направления движения, задаваемому системой автономного управления на тестовой трассе, представлены на рис.8. Получаемая таким образом информация основных параметров функционирования НРТК даёт возможность не только контролировать и обеспечивать его безопасность, но также позволяет получать необходимую информацию для валидации программ численного моделирования работы узлов и систем НРТК при воздействии различных условий на всех этапах испытаний.

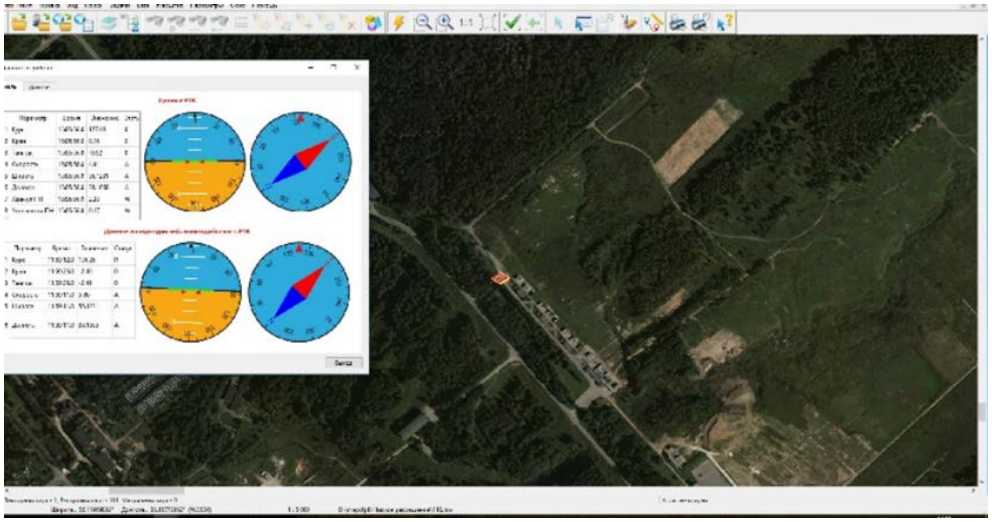


Рисунок 8 – Пример панели контроля соответствия реального курсового направления движения, задаваемому системой автономного управления на тестовой трассе

На основании вышесказанного следует сделать вывод, что специализированные испытания наземных робототехнических комплексов различного назначения, должны, несомненно, основываться на результатах испытаний основных базовых элементов, формирующих структуру робототехнического комплекса. Однако, учитывая сложную функциональную взаимосвязь этих элементов в условиях эквплуататции в недетерминированных условиях, а также возможность наложения различных возмущающих факторов, необходимо сформировать систему комплексных испытаний, что позволило бы с максимальной достоверностью воспроизвести условия применения НРТК в этих условиях, а также предусмотреть необходимые мероприятия для предотвращения возникновения аварийных ситуаций. Кроме того, реализация данных условий в виде реальных физических событий является необходимой испытательной базой для валидации численных методов тестирования НРТК в различных условиях.

1. Lars Apfel. ELROB 2010 Militarishe Aufgabenstellungen in einsatznahen Szenarien//Stategie und Technik. April 2010. – S. 18-21.
2. Цариченко С.Г., Максимов А.А.,Сидоров И.М., Родиченко Н.С. Комплекс для полигонных испытаний роботизированных систем по оценке эффективности захвата и сопровождения цели.//Робототехника и техническая кибернетика. – 2015. -№2(7) – С. 3-11.

S.A.Polovko, A.V. Popov

THE FUTURE USE OF HYBRID GROUPS OF SPECIAL PURPOSE MOBILE ROBOTS

Russian State Scientific Center for Robotics and
Technical Cybernetics, Saint-Petersburg
alexab@rtc.ru, s.orlova@rtc.ru, dnstepanov@rtc.ru

Abstract

The development of control methods and communication technologies led to the transition from the use of individual robotic systems to the use of robot groups. Known common advantages of group application of robots in combat operations are:

- reducing the time of operation in general;
- saving the resources of a single robot due to optimum resource planning group;
- general reliability due to the duplication of functions in the group;
- the possibility of organizing a relay with unstable connection with the control center.

For a number of tasks solved by engineering and special units in hazardous, remote or inaccessible areas, the group application of robots provides additional advantages, namely::

- minimization of dose loads on the robot at work in the fields of radiation;
- creation of realistic 3D models of the situation in hazardous areas by means of multi-angle vision;
- formation of a mobile network of hydroacoustic or radio beacons to improve the reliability of autonomous navigation.

At the same time, combining robots into homogeneous groups by types of basing poses a number of problems associated with the limitations inherent to each type of robots. Combining robots of different types of basing allows the most efficient use of the advantages of each type and compensate for shortcomings. A new level of functionality and a sharp expansion of the operating area is achieved through the use of hybrid groups that combine land, air and sea facilities.

Key words: robots, safety and security, multifunctionality, hybrid groups of robots.

С.А. Половко, А.В. Попов

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ГИБРИДНЫХ ГРУПП МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург
polovko@rtc.ru, apopov@rtc.ru

Аннотация

Развитие методов управления и технологий связи обусловило переход от использования отдельных робототехнических комплексов к применению групп роботов. Известными общими преимуществами группового применения роботов при выполнении боевых операций являются:

- уменьшение времени выполнения операции в целом;
- экономия ресурсов отдельного робота за счет оптимального планирования ресурсов группы;
- повышение общей надежности за счёт дублирования функций в группе;
- возможность организации ретрансляции при неустойчивой связи с центром управления.

Для ряда задач, решаемых инженерными и специальными подразделениями в опасных, удаленных или труднодоступных зонах, групповое применение роботов дает дополнительные преимущества, а именно:

- минимизация дозной нагрузки на робот при работе в полях излучения;
- создание реалистичных 3D моделей обстановки в опасных зонах средствами многоракурсного зрения;
- формирование мобильной сети гидроакустических или радио-маяков для повышения надежности автономной навигации.

Вместе с тем, объединение роботов в однородные группы по видам базирования ставит ряд проблем, связанных с ограничениями, присущими каждому виду роботов. Объединение роботов

различных видов базирования позволяет наиболее эффективно использовать преимущества каждого вида и компенсировать недостатки. Новый уровень функциональности и резкое расширение операционной зоны достигается путем применения гибридных групп, объединяющих наземные, воздушные и морские средства.

Ключевые слова: специальные роботы, охрана и безопасность, многофункциональность, гибридные группы роботов.

Введение

В настоящее время применение специальных РТК для задач обеспечения защиты и безопасности постоянно возрастает в следующих областях:

– патрулирование охраняемых территорий и акваторий, в том числе, зон повышенной террористической опасности;

– проведение разведки и обследования опасных зон при техногенных авариях и катастрофах;

– выполнение аварийно-восстановительных работ при ликвидации последствий аварий и катастроф;

– операции по спасению людей из зон аварий и катастроф.

Развитие интеллектуальной робототехники, методов управление и технологий связи обусловило переход от использования отдельных многофункциональных робототехнических комплексов к группам роботов. Применение роботов в группе имеет следующие очевидные преимущества:

1) Уменьшение времени выполнения операций при увеличении территории охвата;

2) Экономия ресурсов группы за счет оптимального планирования, организации подзарядки, съема и передачи информации на базовых подвижных платформах;

3) Повышение общей надежности за счёт дублирования функций в группе;

4) Возможность ретрансляции данных между членами группы при неустойчивой связи с центральным постом управления

Объединение роботов в группы и коллективы – один из современных трендов робототехники. Различными научными коллективами рассмотрены и проработаны теоретические и методические основы групповой робототехники, создан огромный задел в этой области на уровне фундаментальных исследований, включая [1-9].

– теоретические основы синтеза и оптимизации группового поведения

– методы оптимального планирования маршрутов группы роботов

– алгоритмы распределения целей

– алгоритмы группового управления для игровых задач

В то же время, практическое применение групп роботов до настоящего времени ограничивается немногими прикладными задачами, особенно в сфере специальной робототехники. В значительной степени это связано с ограничениями, присущими каждому отдельному виду роботов (под видом будем понимать вид базирования: наземное, морское, воздушное)

На рисунке 1 представлены в обобщенном виде базовые характеристики роботов различного вида базирования. Здесь к таким характеристикам отнесены:

– зона обзора средствами систем технического зрения (телевизионных, гидроакустических, радиолокационных и так далее);

– дальность связи при передаче больших объемов информации, в первую очередь, видеоинформации;

– возможность выполнения технологических операций (манипуляционных, транспортных, эвакуационных и тому подобных).

Рисунок 1 – Характеристики роботов различного вида базирования

Объединение роботов различных видов базирования в гибридную (гетерогенную) группу позволяет наиболее эффективно использовать преимущества каждого вида и компенсировать недостатки.

Таким образом, необходимым шагом по повышению эффективности использования группы роботов является создание гибридных групп.

Гибридная группа объединяет:

– беспилотные летательные аппараты (БПЛА);

– наземные мобильные робототехнические комплексы (РТК);

– безэкипажные катера (БЭК);

– автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА).

На сегодняшний день все перечисленные виды роботов активно разрабатываются и серийно выпускаются в развитых странах.

Состав гибридной группы иллюстрирует рисунок 2.

Рисунок 2 – Состав гибридной группы роботов

Преимущества гибридных групп роботов

Рабочая зона гибридной группировки роботов способна охватывать большие территории и акватории и обеспечивать выполнение задач защиты и безопасности в масштабах региона.

Использование в группе роботов различного базирования обеспечивает принципиально новые возможности в задачах планирования, принятия решений и оперативного управления группой роботов, выполняющих миссии защиты и безопасности

Коротко укажем основные преимущества гибридной группы роботов

В первую очередь, для задач планирования и принятия решений к ним относятся резкое расширение операционной зоны и новый уровень функциональности (рисунок 3).

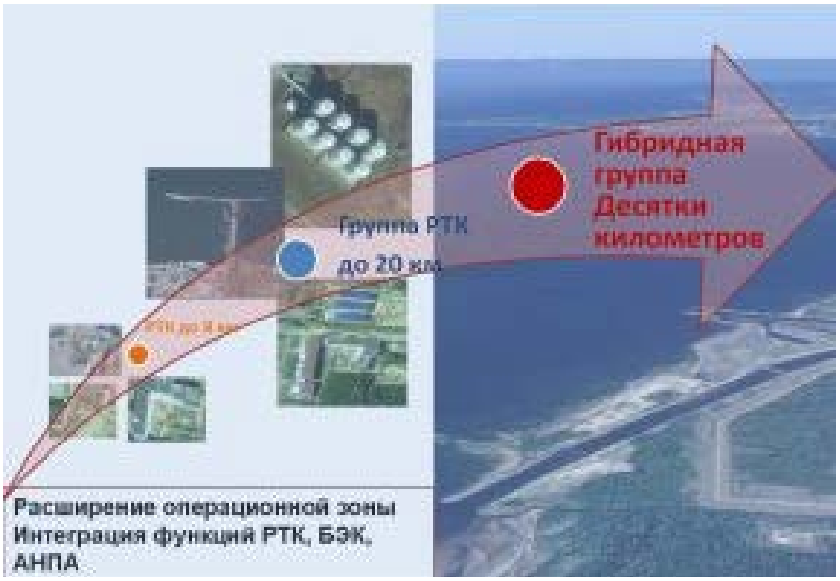


Рисунок 3 – Преимущества гибридной группы.
Расширение операционной зоны

Если один наземный РТК, как правило, имеет операционную зону в несколько километров, а группа наземных РТК - в пределах 20 километров, то зона работ гибридной группы может достигать десятков километров.

Операционная зона АНПА может составить до 100-150 километров, однако на протяжении всей миссии одиночный АНПА практически не имеет связи с центральным постом, что крайне нежелательно при решении задач мониторинга обстановки или охраны акватории. Возможность передачи данных через БПЛА при временном всплытии или через БЭК сопровождения существенно повышает эффективность использования подводных роботов для рассматриваемых задач.

Функциональность гибридной группы не просто механически суммирует функции членов группы. При работе группы, координируемой с центрального поста управления возникает синергетический эффект взаимного усиления.

Следующим важным преимуществом гибридной группы является интеграция информации об обстановке, поступающей от сенсоров различной физической природы.

Примерами такого комплексирования являются [10-12]

– комплексная информация о подводных объектах, формируемая по данным гидроакустики и электромагнитных искателей;

– комплексная информация о радиационно-опасных объектах, формируемая по данным систем телевидения и гамма-видения;

– комплексная информация об опасных подвижных объектах, формируемая по данным телевизионных и радиолокационных систем.

По сути дела, гибридная группа роботов реализует принцип мультимодальной сенсорики [13], характерный для сенсорной системы человека, когда информация об объекте формируется принципиально разными способами с последующим её комплексированием для выработки правильной реакции. Принцип проиллюстрирован рисунком 4

В системах защиты и безопасности принцип мультимодальной сенсорики обеспечивает надежную идентификацию угроз, тревог и опасностей для принятия адекватных и своевременных решений о парировании этих угроз.

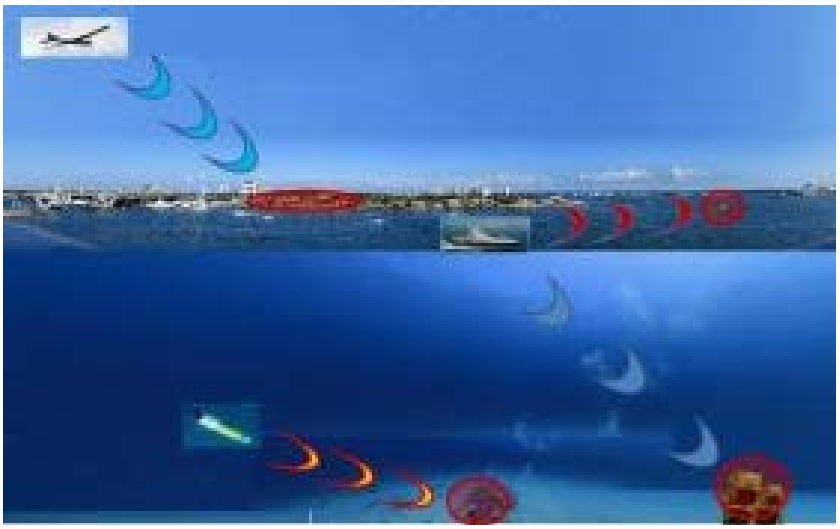


Рисунок 4 – Преимущества гибридной группы.
Интегральная информация об обстановке

Исключительно большое значение для планирования групповой миссии технологических наземных РТК и АНПА имеют разведывательные миссии БПЛА и БЭК соответственно. На рисунке 5 показан пример планирования операций наземных роботов по карте проходимости, построенной по результатам предварительного облета рабочей зоны БПЛА. Формирование таких карт и их использование на стадии планирования миссии повышает безопасность функционирования наземных РТК и обеспечивает экономию энергоресурсов.

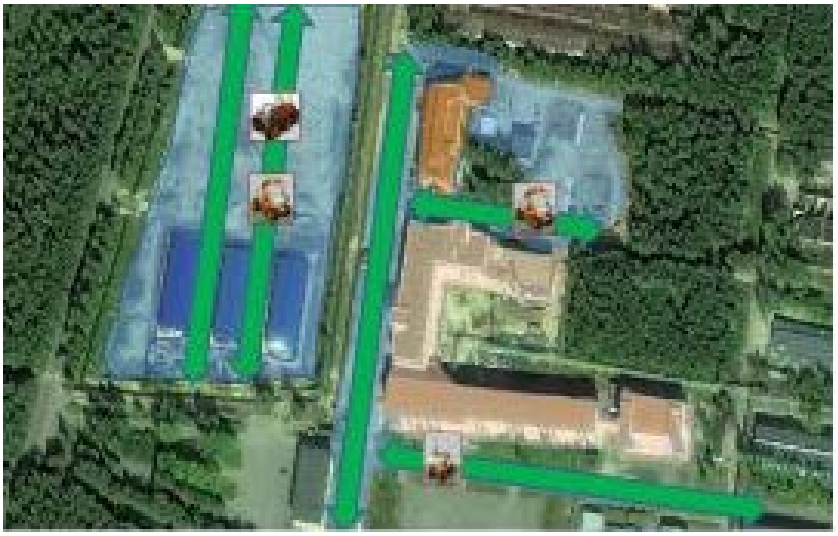


Рисунок 5 – Планирование работы наземных РТК по карте проходимости,
полученной с помощью БЛА

Интеграция видео данных, поступающих от БЛА и наземных роботов, дает возможность строить реалистические 3D модели обстановки средствами многоракурсного зрения (рисунок 6).

Рисунок 6 – Пример построения реалистичной 3D модели обстановки средствами многоракурсного зрения

Предварительная разведка местности посредством БЛА предотвращает захода наземного РТК в зону недопустимо высокого радиационного загрязнения (рисунок 7).

Рисунок 7 – Пример взаимодействия БЛА и наземного робота при работе в радиационных полях

Принципиально новые возможности по организации надёжной связи для оперативного управления группой обеспечивается формированием мобильной сети маяков и ретрансляторов, в качестве которых может быть использован любой робот - член группировки. Современная сетевая технология связи (MESH-сеть) гарантирует надёжную, реконфигурируемую, перемещающуюся вместе с группой сеть коммуникации и даёт возможность использовать современные «облачные» технологии обработки больших объемов данных, о которых будет сказано ниже. Варианты построения сетевого взаимодействия показаны на рисунке 8.

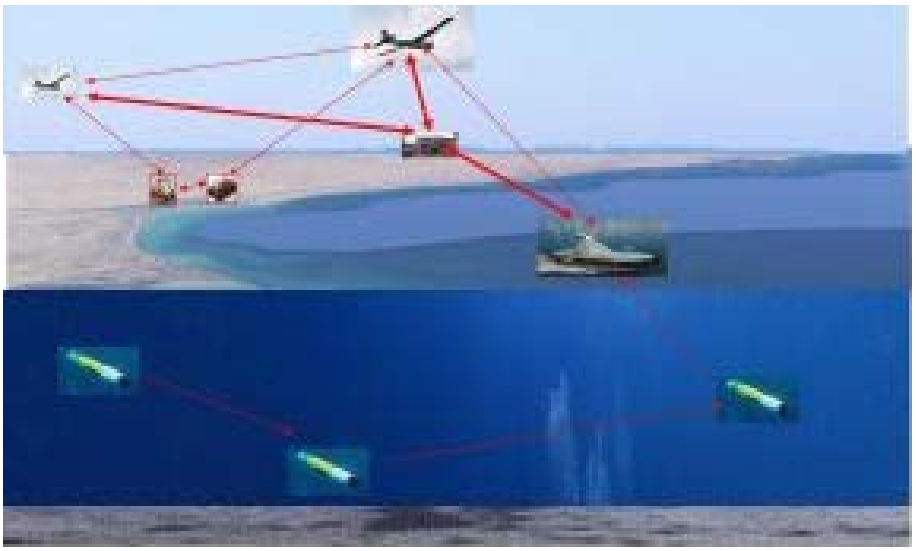


Рисунок 8 – Формирование мобильной сети ретрансляторов и маяков
в рамках гибридной группы роботов

Для своевременного принятия решений и оптимизации оперативного управления в комплексах защиты и безопасности большую роль играет возможность детализации обстановки в контролируемой зоне «по запросу», то есть при наступлении события, зафиксированного средствами обобщенного наблюдения. В гибридной группе примером такой реакции является, например, выход наземного РТК или АНПА на патрулирование зоны, где средствами БПЛА или БЭК зафиксирована угроза нарушения охраняемого периметра. Пример такого взаимодействия показан на рисунке 9.

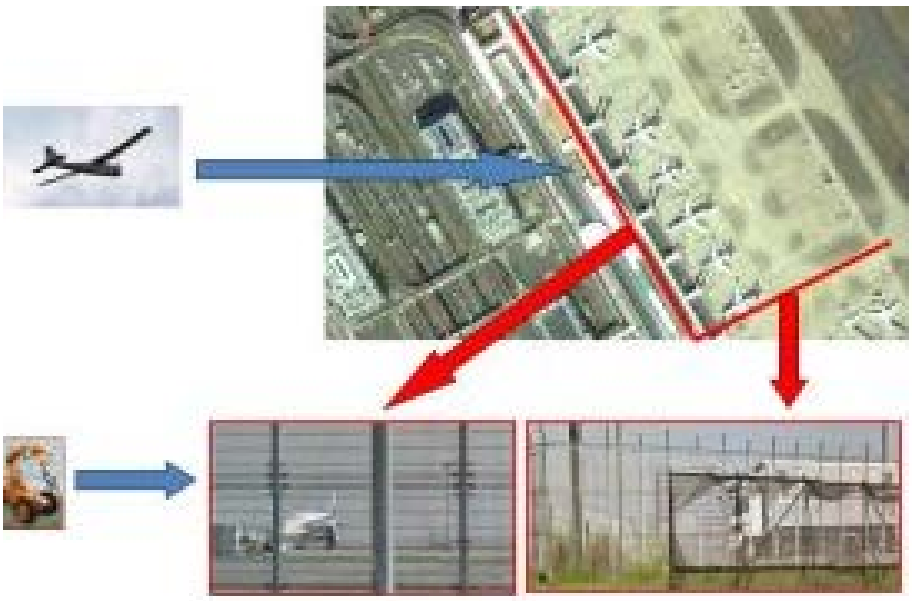


Рисунок 9 – Формирование объективной оценки обстановки
разных уровней детализации

В целом, гибридные группы роботов имеют большие перспективы использования в качестве элементов специальных комплексов охраны, защиты и безопасности.

Проблемные вопросы

При всех преимуществах применения группировок роботов, практическая реализация ставит серьёзную проблему - резкий рост объемов данных, передача и обработка которых необходимы для планирования, оперативного управления и принятия решений.

Традиционным общим подходом здесь является развитие индивидуальных способностей роботов.

В первую очередь, это способность к восприятию, связанная с использованием более совершенных средств очувствления и разработкой более совершенных алгоритмов интерпретации получаемых данных для адекватной оценки ситуации.

Далее, это способность к адаптации, причём на смену традиционной адаптации к параметрам обстановки приходит ситуационная адаптация к выполняемым задачам за счёт развития интеллектуальности роботов.

Наконец, постепенно развивается способность роботов самостоятельно принимать решения, в том числе, координируемые с другими роботами группы при минимальном участии центрального поста управления.

Перечисленные задачи по развитию индивидуальных способностей роботов резко повышают требования к бортовым вычислительным ресурсам, при этом далеко не гарантируется надежность вырабатываемых оценок и решений, особенно в сложной и динамично меняющейся обстановке.

Другой подход заключается в упрощении и удешевлении роботов-членов группировки при максимальном развитии коллективных качеств группы.

Для практической реализации перечисленных результатов для гибридных групп, при работе которых объем данных возрастает на несколько порядков, перспективным методом организации выполнения задач планирования, оперативного управления и, в особенности, принятия решений при работе гибридной группы роботов являются разрабатываемые в ЦНИИ РТК алгоритмы на базе технологий «облачных» вычислений и алгоритмы навигации на основе моделей факторизации данных (то есть их группирования на основе выявляемых взаимосвязей) с применением множества баз знаний (онтологий) [14-15]

Предлагаемый подход существенно снижает требования к производительности бортовых вычислителей роботов группы, при этом распределённая обработка данных оказывается более эффективной.

Управление движением группы осуществляется комбинированным методом:

– множество допустимых траекторий каждого робота определяется с учетом локальной информации получаемой от сенсоров

– синхронизация и обеспечение безопасности перемещений в группе в целом, осуществляется на основе контекстно-ориентированных стратегий поиска допустимых решений.

Ограничения на траектории движения формируются на основе сенсорной информации с помощью модели пространства перемещений в виде виртуальных потенциальных полей. Это позволяет реализовать гибридную стратегию управления «планирование-действие-восприятие», причем для каждого робота используется виртуальный «аватар», обеспечивающий:

– планирование миссии

– одновременную корректировку карты пространства операций и определение местоположения робота на карте.

Сетецентрическая система управления позволяет обеспечить взаимодействие с каждым роботом и группировкой в рамках облачного сервиса. Применение предложенного подхода к управлению группировкой позволяет учитывать многообразие, скорость изменения и содержательность данных. Кроме того, это дает возможность синтезировать эффективные вычислительные алгоритмы решения задачи группового управления в условиях пространственно-ситуационной неопределенности за счет объединения декларативных и процедурных знаний в модель поведения каждого робота, участвующего в выполнении целевых операций.

Заключение

В докладе приведены основные соображения о преимуществах гибридных групп роботов для решения задач специальной робототехники.

Показано, что на современном этапе развития создание таких групп должно опираться как на существующие частные решения в области разработки наземных, морских и воздушных роботизированных комплексов, так и на достижения в области информационных технологий, включая сетевые решения. Дальнейшее развитие этого направления связано с решением проблемы создания тиражируемых информационных технологий для разработки и отработки систем управления гибридными группировками роботов. В качестве критических (прорывных) технологии в этой области следует выделить: технологии реализации самоорганизующихся, масштабируемых, защищенных сетей

передачи данных с мобильными и статическими узлами, технологии высокоскоростной связи, а также дальнейшее развитие технологий формирования сложного группового поведения.

1. Попов Э.В., Г.Р.Фридман. Алгоритмические основы интеллектуальных роботов и искусственного интеллекта. – М.: Наука, 1976. – 455 с.
2. Охоцимский Д.Е., Павловский В.Е., Плахов А.Г., Туганов А.Н. Моделирование игры роботов-футболистов и базовые алгоритмы управления ими // Искусственный интеллект, №3, 2000. – С.534-541.
3. Юревич Е. И. О проблеме группового управления роботами // Мехатроника, автоматизация, управление, 2004, №2. С.9-13.
4. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов // И. А. Каляев, А. Р. Гайдук, С. Г. Капустян. – М.: Физматлит, 2009 – 280 с.
5. Городецкий В.И., Серебряков С.В., Троцкий Д.В. Средства спецификации и инструментальной поддержки командного поведения автономных агентов // Изв. ЮФУ, 2011. № 3. С. 23–41.
6. Андриевский Б.Р., Матвеев А.С., Фрадков А.Л. Управление и оценивание при информационных ограничениях: к единой теории управления, вычислений и связи // Автоматика и телемеханика, 2010, № 4. С. 34-99.
7. Картавцев К.В., О.Н. Мелехова, С.В. Тимченко. Модель детерминированной сети роботов. // Доклады ТУСУРа, № 1 (21), часть 1, июнь 2010.
8. Иванов Д.Я.. Информационный обмен в больших группах роботов. // Журнал «Искусственный интеллект», №4, 2010.
9. Тимофеев А.В., Юсупов Р.М. Р.М.. Принципы построения интегрированных систем мультиагентной навигации и интеллектуального управления мехатронными роботами. // International Journal "Information Technologies & Knowledge" Vol.5, Number 3, 2011.
10. Лопота А.В., Николаев А.Б. Современные тенденции развития робототехнических комплексов. Беспилотные летательные аппараты, 2015. URL: http://www.rtc.ru/ru/o-tsnii-rtk/publikatsii (дата доступа 05.03.2018)
11. Лопота А.В., Николаев А.Б. Современные тенденции развития робототехнических комплексов. Наземные робототехнические комплексы военного и специального назначения 2015. URL: http://www.rtc.ru/ru/o-tsnii-rtk/publikatsii (дата доступа 05.05.2018)
12. Лопота А.В., Николаев А.Б. Современные тенденции развития робототехнических комплексов. Морские робототехнические комплексы военного и специального назначения, 2015. URL: http://www.rtc.ru/ru/o-tsnii-rtk/publikatsii (дата доступа 05.05.2018)
13. Ivry, Richard (2009). Cognitive Neuroscience: The biology of the mind. New York: W.W. Norton and Company. pp. 199. ISBN 978-0-393-92795-5.
14. Заборовский Владимир Сергеевич, Мулюха Владимир Александрович, Лукашин Алексей Андреевич, Ильяшенко Александр Сергеевич Управление группировками киберфизических объектов в среде облачных вычислений // Известия ЮФУ. Технические науки. 2015. №10 (171). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/upravlenie-gruppirovkami-kiberfizicheskih-obektov-v-srede-oblachnyh-vychisleniy (дата обращения: 14.05.2018).
15. Заборовский Владимир Сергеевич, Лукашин Алексей Андреевич Система контроля доступа в среде облачных вычислений // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2012. №4 (152). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/sistema-kontrolya-dostupa-v-srede-oblachnyh-vychisleniy (дата обращения: 14.05.2018

M.V. Mikhaylyuk [1], E.V. Strashnov [1], A.A. Prilipko [1], B.I. Kryuchkov [2], V.M. Usov [2]

THE ON-BOARD SIMULATION AND TRAINING SYSTEM FOR PERFORMING MANIPULATOR'S ACTIONS IN THE SUPERVISORY CONTROL MODE AND BUILDING THE VISUAL FEEDBACK FOR COSMONAUTS

[1] Federal State Scientific Research Institute of System Analysis of the Russian Academy of Science, Moscow, mix@niisi.ras.ru
[2] Federal State Gagarin Research&Test Cosmonaut Training Center, Star city, Moscow region, b.kryuchkov@gctc.ru ; v.usov@gctc.ru

Abstract

The paper deals with the problem of semi-automatic control of virtual robot manipulators in simulation and training complexes (S&TC). Potential applications of these S&TC – use simulators on the Board of space stations, allowing a space crew to support the control skills during long orbital flights, and to work out new ways of using manipulators. To solve this problem is used the technology of creating virtual control panels, with the help of which the position of the working body of the manipulator is controlled in semi-automatic mode. The displacement of the working element set by the remote control is transmitted to the functional scheme, in which the angles of rotation in the joints of the robot are calculated. To do this, the method of coordinate descent is used, that allowed to solve the problem of inverse kinematics, and the PD-controller to ensure the required angles of rotation. Coding of actions based on the generated scripts, which allow to make a formalized description of the method of action, founded by the manipulator, and to carry out the construction of a 3D interactive visual image for visual monitoring by cosmonauts on the principles of visual feedback.

The proposed method of semi-automatic control of robots was realized on the example of a virtual control panel for control a virtual anthropomorphic robot.

Keywords: virtual robot, semi-automatic control, coordinate descent method, PD-regulator, 3D-visualization, on-Board simulator, simulation and training complexes (S&TC).

М.В. Михайлюк [1], Е.В. Страшнов [1], А.А. Прилипко [1], Б.И. Крючков [2], В.М. Усов [2]

БОРТОВОЙ ИМИТАЦИОННО-ТРЕНАЖЕРНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ОПЕРАЦИЙ МАНИПУЛЯТОРОМ В СУПЕРВИЗОРНОМ РЕЖИМЕ И ПОСТРОЕНИЯ ВИЗУАЛЬНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ ДЛЯ КОСМОНАВТА

[1] ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, Москва, mix@niisi.ras.ru
[2] ФГБУ НИИ ЦПК имени Ю.А.Гагарина, Звездный городок, Моск. обл., b.kryuchkov@gctc.ru ; v.usov@gctc.ru

Аннотация

Рассматривается задача полуавтоматического управления манипуляторами виртуальных роботов в имитационно-тренажерных комплексах (ИТК). Потенциальная область применения этих ИТК – использование бортовых тренажеров, позволяющих экипажу орбитальных станций поддерживать навыки управления при длительных полетах, а также разрабатывать новые способы использования манипуляторов. Для решения данной задачи задействована технология создания виртуальных пультов управления, с помощью которых в полуавтоматическом режиме осуществляется управление положением рабочего органа манипулятора. Задаваемое с помощью пульта смещение рабочего органа передается функциональной схеме, в которой выполняется расчет напряжений, которые необходимо подать на электрические двигатели в шарнирах робота для осуществления нужных поворотов этих шарниров. Для этого применяется метод покоординатного спуска, предназначенный для решения задачи инверсной кинематики, и ПД-регулятор для обеспечения требуемых углов поворота. Предложенный метод полуавтоматического управления роботами реализован на примере виртуальной панели управления виртуальным антропоморфным роботом.

Ключевые слова: виртуальный робот, полуавтоматическое управление, метод покоординатного спуска, ПД-регулятор, 3D-визуализация, бортовой тренажер, имитационно-тренажерный комплекс.

Бортовые тренировки с использованием ИТК – важный резерв повышения безопасности полета применительно к проблеме использования на МКС роботов-помощников экипажа

Одним из базовых направлений обеспечения безопасности пилотируемых космических полетов являются бортовые тренировки экипажа, направленные на отработку навыков выживания при аварийных ситуациях, поддержание навыков управления системами станции и выполнения динамических операций и физических тренировок с учетом возможного влияния перерывов и воздействия факторов космического полета на организм человека и, в частности, на его сенсорную и двигательную сферы. В перспективе, помимо плановых мероприятий, выполняемых в настоящее время на МКС, можно полагать, что при использовании роботов-помощников антропоморфного типа будут также периодически проводиться тренировки, направленные на повышение готовности членов экипажа к их применению, в том числе, к непредвиденным действиям при аварийных ситуациях. Из этого следует, что внедрение на борт орбитальной станции роботов – помощников экипажа для выполнения разного рода манипуляций будет сопровождаться созданием бортового имитационно-тренажерного комплекса (ИТК) для поддержания у космонавтов навыков взаимодействия с антропоморфным роботом. В определенной степени бортовой тренажер управления антропоморфным роботом при выполнении манипуляций можно рассматривать как разновидность электронного консультанта, способного наглядно продемонстрировать движения руки антропоморфного робота для облегчения понимания способа выполнения конкретного действия, что накладывает дополнительные требования на способы построения обратной связи по визуальному каналу с учетом особенностей восприятия человеком окружающего пространства и ведения пространственной ориентировки.

Речь идет о необходимости использовать пространственно-ориентированные технологии создания виртуального окружения и обеспечения человека-оператора (ЧО) информационной поддержкой, учитывающей предназначение робота-манипулятора для выполнения как ранее запланированных, так и новых исполнительных действий.

Проблема использования бортовых тренажеров в длительных орбитальных полетах нашла отражение как в отечественных, так и зарубежных публикациях [1,2].

Первоначально исследователей преимущественно интересовали вопросы создания бортового тренажера, включающего двухмерную модель интерьера космической станции для имитации работы экипажа с бортовым оборудованием при отработке ситуации «разгерметизация» и применительно к возникновению в полете других чрезвычайных ситуаций. В дальнейшем состав тренировок был существенно дополнен в отношении сохранения и поддержания в длительных полетах навыков управления кораблем и его системами. Важно, что при этом во многом сохранилась ориентация применяемых технологий моделирования на пространственно-ориентированные решения, что вытекало из объективных трудностей выполнения ориентировки в конструктивно сложном пространственном окружении герметически замкнутого объекта – многомодульной орбитальной станции. Именно это обстоятельство стимулировало использование подходов на основе 3D моделирования и визуализации. Сегодня разработка тренажеров, моделирующих космические операции в целях сохранения профессиональных навыков и для оценки работоспособности членов экипажа – важное прикладное направление исследований надежности профессиональной деятельности и составная часть современной системы повышения безопасности длительных пилотируемых полетов.

Самостоятельное направление построение бортовых тренажёров на базе лэптопов для поддержания навыков выполнения динамических операций, в том числе, управления сближением и стыковкой (перестыковкой) кораблей типа «Прогресс М-М» с МКС в режиме телеуправления, а также навыков управления кораблём «Союз ТМА-М» на участке спуска на Землю [3].

В настоящее время бортовые тренировки экипажа орбитальной станции проводятся в нескольких направлениях, включающих типовые динамические операции, действия экипажа в аварийной ситуации, при пожаре и проверке готовности оборудования к аварийному покиданию МКС, а также широкий круг научных космических экспериментов (КЭ) и тренировки для профилактики расстройств состояния здоровья с применением комплекса бортовой аппаратуры и медицинских тренажеров.

Из других полетных операций на МКС необходимо выделить имеющие длительную предысторию космические эксперименты (КЭ), связанные с изучением влияния факторов полета на эффективность и надежность операторской деятельности, примером которых, в частности, является тренажер стыковки

«Пилот» и, как его развитие, используемая в современном КЭ «Пилот-Т» программа по ручному управлению динамическими операциями (облет, причаливание и стыковка), которая предусматривает выполнение имитационных задач по пилотированию при одновременном осуществлении контроля психофизиологического состояния организма космонавта [4-6].

Развитие программы КЭ также свидетельствует о необходимости улучшения дистанционного взаимодействия космонавта с манипуляторами в пилотируемых космических полетах [7,8].

В работах [9,10] отмечается необходимость использования бортовых имитационных комплексов (симуляторов) в целях совершенствования медицинского обеспечения полетов. В частности, к новым направлениям применения на МКС медицинских роботов предлагается относить:

1) Построение на технологиях виртуальной реальности, информатики и робототехники бортовых тренажеров-симуляторов, позволяющих обеспечить выработку новых и поддержание у экипажа имеющихся практических навыков и приёмов оказания неотложной медицинской помощи в космическом полете.

2) Применение в экстренных ситуациях в автономном полете манипуляционных роботов для робот-ассистированной хирургии при некоторых нарушениях состояния здоровья у членов экипажа.

3) Создание новых и развитие существующих медицинских технологий профилактики нарушений состояния здоровья космонавтов на основе роботизированных биотехнических комплексов, позволяющих на принципах биологической обратной связи обеспечивать благоприятные условия для: а) адаптации организма к факторам полета; б) упреждающей коррекции и профилактики нарушений доклинического уровня; в) восстановления работоспособности космонавта после перенесенных заболеваний и травм, стресс-индуцированных расстройств и др.

Краткий экскурс из области применения бортовых тренажеров свидетельствует о том, что внедрение новых перспективных объектов управления на борт орбитальной станции должно сопровождаться анализом вопроса, насколько полно сохраняются в полете навыки выполнения конкретных полетных операций, насколько часто они выполняются и достаточен ли первоначальный наземный опыт для их реализации без проводимых на постоянной основе бортовых «поддерживающих навыки» тренировок. При этом каждый вид новых перспективных объектов управления требует решения, на какой технической базе и с помощью каких технологий будет создаваться ИТК.

Если кратко охарактеризовать те новые особенности, которые необходимо учитывать при создании ИТК для бортового исполнения применительно к антропоморфным манипуляторам, то необходимо выделить некоторые новые по сравнению с пилотажными тренажерами существенные требования: необходимость реализации различных способов управления в зависимости от сложности двигательной задачи и наличия объектов среды, затрудняющих манипуляции; раздельное рассмотрение типовых планируемых заданий или, напротив, появления задания, имеющего выраженную новизну; акцент на вид контроля исполнительной активности манипулятора со стороны человека. В общем случае, сохраняется тенденция к расширению степени автономности робота-манипулятора, но одновременно в аспектах безопасности, особенно в начальных стадиях внедрения, не снижаются требования к оперативности и полноте контроля со стороны экипажа. Эти положения выливаются в построение на базе виртуальных прототипов моделей и робота, и той виртуальной среды, в которой он функционирует. В работах [11-13] отмечено, что для улучшения качества обратной связи по визуальному каналу, необходимо предусматривать различные способы отображения среды, предполагающие многопортовый вывод информации о пространственном положении объекта воздействия, схвата манипулятора, модели робота в различных системах координат, включая эгоцентрические системы координат, связанные с головой и/или схватом робота, а также пространственные координаты по типу географических для задания положения объекта – цели в рабочем пространстве.

Такая постановка задачи предполагает наличие в составе программного обеспечения средств ряда взаимосвязанных программных модулей [13-15]:

– моделирования ручного и супервизорного управления виртуальным роботом – манипулятором;

– поддержания интерактивности взаимодействия ЧО с виртуальной средой с применением разных человеко-машинных интерфейсов;

– моделирования и 3D визуализации виртуального окружения в реальном масштабе времени в разных системах координат в зависимости от информационных потребностей ЧО.

Рассмотрим первую из перечисленных выше задач, а именно, создание программного обеспечения моделирования ручного и супервизорного управления роботом, в данном случае его виртуальной моделью.

Моделирование и визуализация дистанционного управления роботом средствами ИТК

Необходимо отметить, что согласно [11,15] постановка учебно-демонстрационных режимов при разработке сценариев применения ИТК для формирования, поддержания и совершенствования навыков управления манипуляторами возможна при разных предположениях о характере взаимодействия «человек – робот» в ходе предварительного формирования способа действия и последующего его исполнения роботом.

Известной из литературы является постановка задачи «обучение робота показом движения» [11], предполагающей, что человек-оператор в стационарных условиях, при отсутствии помех, способен задать в копирующем режиме «эталонное» исполнение действия, которое манипулятор в последующем способен воспроизвести в реальных условиях. Тем самым, не только решается задача программирования исполнительного действия, но и осуществляется последующий контроль правильности исполнения. Несколько другая, но дополняющая первую, постановка состоит в том, чтобы робот-манипулятор продемонстрировал человеку в супервизорном режиме способ выполнения движения для захвата и перемещения объекта, руководствуясь заранее заданными критериями и ограничениями, что в последующем позволяет человеку понять предлагаемый способ исполнения действия (в том числе, действий, запрограммированных другими операторами в наземных условиях), а при необходимости перейти в ручной режим управления манипулятором. Этот переход подразумевает способность человека в ходе обучения и тренировок сформировать у себя внутренний образ (представление) об окружающей среде и при позиционировании себя в эгоцентрических координатах робота «вжиться» в мысленный образ выполнения манипуляции. Из психологии и физиологии труда известно, что именно наличие такого регуляторного образа позволяет наиболее просто и надежно выполнять сложные двигательные акты, даже при наличии помех и трудностей восприятия ориентации в пространстве.

Дополнительный контур контроля запрограммированных действий антропоморфного робота в супервизорном режиме может быть выполнен на основе имитации управления роботом по тем командам, которые транслированы из скриптов. Эта задача также может быть решена на основе подхода, который реализован в системе “GLView” [13,14], с использованием скриптовых команд для задания изменений пространственного положения звеньев руки антропоморфного робота и последующего визуального 3D представления, что составляет важную часть технологии построения виртуального окружения и базы знаний о составе заранее программируемых действий.

Структуру предлагаемого к реализации ИТК, как бортового тренажера, можно представить в виде отдельных подсистем, основными из которых являются подсистема управления ИТК, подсистема динамики и подсистема визуализации.

Непосредственное взаимодействие ЧО с подсистемой управления ИТК осуществляется через интерфейсные модули. Они могут быть представлены как виртуальными пультами управления с интерактивными виртуальными управляющими элементами, так и модулями распознавания речевых и жестовых команд. В типовом и наиболее удобном для реализации тренировочного режима виде подсистема управления может быть реализована с применением виртуальных пультов управления и функциональных схем для расчета управляющих сигналов. При таком решении подсистема управления получает на вход оцифрованные воздействия ЧО на виртуальные элементы управления и формирует на выходе управляющие сигналы для перемещения и поворота виртуальных объектов, которые передаются в подсистему динамики.

Подсистема динамики загружает виртуальную модель и на основе динамических параметров ее объектов рассчитывает новые положения и ориентации этих объектов через промежуток времени Δt моделирования. Эти данные передаются в подсистему визуализации, которая производит синтез изображений виртуальной 3D сцены в масштабе реального времени на мониторе, который служит системой отображения информации для ЧО.

Подсистема визуализации должна позволять реализовать, в частности, режим многопортового вывода информации на монитор, при котором одновременно визуализируется несколько изображений, например, для представления визуальной сцены в разных системах координат, как в эгоцентрической

(связанной с антропоморфным роботом), так и с позиций «внешнего наблюдателя», включая перспективные проекции сложной визуальной картины.

В случае использование речевого и жестового интерфейсов подсистема управления с помощью специализированных модулей распознает команды управления от ЧО, подаваемые жестами и речью, а далее по цепочке формируются управляющие сигналы для перемещения и поворота виртуальных объектов и их визуализации [22-25].

В перспективе бортовой тренажер робототехнической системы будет создаваться с учетом реальных характеристик антропоморфного робота (его «антропометрических», кинематических и других показателей). В настоящее время вопросы, каким должен быть такой робот-помощник и каким функционалом он будет наделен, находятся в стадии проектных решений, и, исходя из этого, в данной работе принят для дизайна виртуальной сцены вариант макета робота SAR-401 (ОАО «Андроидная техника»), описанного в работах [16-18]. В развитие существующих проектов в рамках проекта ФПИ заявлено создание отечественного антропоморфного робота ФЕДОР (FEDOR — Final Experimental Demonstration Object Research), который по заявлению разработчиков будет иметь функционал выполнения широкого круга различных манипуляций, чтобы участвовать в совместно выполняемых с экипажем полетных операциях. Это, в свою очередь, будет способствовать более активному применению бортового тренажера, поскольку с ростом числа операций и способов выполнения двигательных задач будет возрастать потребность в поддержании и совершенствовании двигательных навыков ЧО в космическом полете [18,19]. Вопрос периодичности таких бортовых тренировок необходимо решать с учетом длительности перерывов, что требует самостоятельных исследований. Пример проведения исследований по изучению сохранности навыков управления динамическими объектами и зависимости качества управления от составляющих человеческого фактора можно найти в работах, посвященных описанию КЭ «Пилот» и «Пилот-Т» применительно к ручному управлению динамическими операциями (облет, причаливание и стыковка) [4-6].

В данной статье в интересах построения ИТК рассматриваются особенности реализации командного и супервизорного режима управления виртуальными роботами [11,20-21]. В частности, рассматриваются виртуальные манипуляционные роботы, содержащие вращательные шарниры с одной степенью свободы, оснащенные электроприводами. Для реализации полуавтоматического режима предлагается управление с помощью виртуального пульта, включающего джойстик и вариант управления, для которого отклонение джойстика задает величину и направление смещения рабочего органа манипулятора. Это приводит к необходимости решать задачу пересчета заданного оператором перемещения рабочего органа в величины напряжений, подаваемых на электроприводы робота.

Расчет углов поворота в сочленениях робота осуществляется методом покоординатного спуска, предназначенного для решения задачи инверсной кинематики, а для вычисления напряжений в функциональной схеме реализован специальный ПД-регулятор.

Рассмотрим, следуя работе [20], один из возможных способов реализации полуавтоматического управления многозвенным манипулятором робота (для руки антропоморфного робота это трехзвенная конструкция «плечо – предплечье – кисть»).

Метод покоординатного спуска в задаче инверсной кинематики

Рассмотрим кинематическую цепь (манипулятор робота), состоящую из N звеньев, соединенных осевыми шарнирами, и одного рабочего органа P на концевом звене (см. рис. 1).

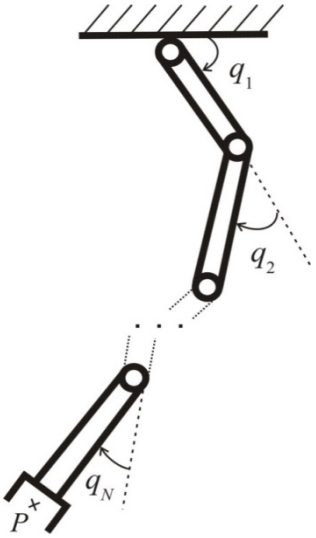


Рисунок 1 – Кинематическая цепь

В начальный момент времени манипулятор находится в некотором разрешенном положении, которое определяется набором углов q_{ic} поворотов в его шарнирах, а рабочий орган находится в точке P_c. Зададим некоторую точку P_d, в которую должен перейти рабочий орган. Задача инверсной кинематики в полуавтоматическом режиме управления манипулятором состоит в вычислении углов поворотов Δq_i, которые перемещают рабочий орган P из точки P_c в точку P_d. При этом, если точка P_d является недостижимой, то допускается перемещение в точку P'_d наиболее близкую к P_d. На углы поворота $q_i = q_{ic} + \Delta q_i$ могут быть наложены ограничения $q_{i,min} \le q_i \le q_{i,max}$, $i = 1,\ldots,N$. Здесь мы не учитываем ориентацию рабочего органа, т.е. нам необходимо управлять только его положением. Эта задача может иметь несколько решений или не иметь ни одного решения. Решать ее предлагается с помощью итерационного метода покоординатного спуска [26,27].

Суть метода состоит в том, что шарниры в сочленениях поворачиваются в определенном порядке постепенно приближая текущее положение рабочего органа к целевому. Каждый поворот выполняется до тех пор, пока рабочий орган не станет максимально близок к целевой точке. Порядок поворотов шарниров следующий: сначала поворачивается N-й шарнир, затем N-1-й, потом опять N-й, N-1-й и N-1-й, опять N-й и т.д. Если на каком-то шаге целевая точка достигнута, то процесс прекращается.

Если пройдены все шарниры и углы поворота в них равны нулю, то целевая точка недостижима. В работах [20,28] описан алгоритм, реализующий метод покоординатного спуска с условием возврата к последнему шарниру.

Реализация полуавтоматического режима управления роботом в прототипе ИТК

В ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН разработан макет ИТК, предназначенный для моделирования движения виртуальных роботов в виртуальном окружении, который рассматривается как прототип для построения бортового тренажера робототехнических систем применительно к проекту создания космического антропоморфного робота.

Данный программный комплекс содержит подсистемы визуализации, динамики и управления.

Для реализации командного режима управления виртуальными роботами в ИТК была разработана технология виртуальных пультов управления [20,21].

Система управления в данном случае состоит из следующих компонентов: редактор пультов управления, редактор функциональных схем и модуль вычисления управляющих сигналов [28].

С помощью редактора пультов управления создается визуальное представление пульта, в редакторе функциональных схем создается схема расчета управляющих сигналов для управления роботом, а модуль вычисления управляющих сигналов обеспечивает работу пульта и функциональной схемы в реальном режиме времени.

Виртуальный пульт управления представляет собой схематическое изображение торса антропоморфного робота, на котором задано расположение шарниров, камер и других управляемых элементов.

На рис. 2 показан предлагаемый дизайн для виртуального пульта управления антропоморфным роботом в состав ИТК, в котором используются следующие обозначения:

1 – это рабочие органы,

2 – шарниры,

3 – джойстик.

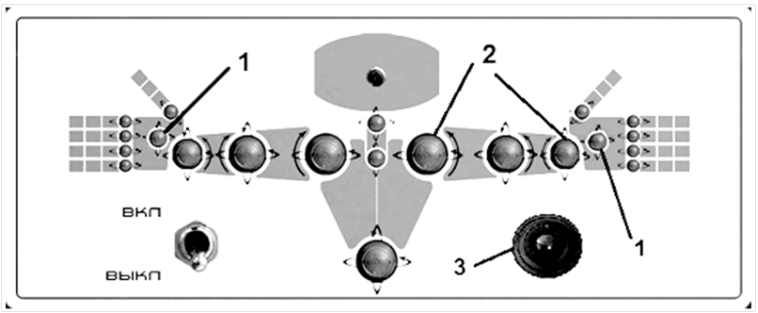


Рисунок 2 – Виртуальный пульт управления антропоморфным роботом

С помощью этого пульта управление осуществляется как в командном, так и в полуавтоматическом режиме.

В режиме тренировки оператор тренажера с помощью мыши может выбрать либо один или несколько шарниров, либо один рабочий орган.

После этого с помощью перемещения трехстепенного виртуального элемента управления типа «Джойстик» он может управлять движением звеньев робота в выбранных шарнирах.

Супервизорный режим управления предполагает, что ЧО отдает роботу команду, для выполнения которой робот самостоятельно производит довольно сложные движения. Команду можно подавать нажатием одной кнопки пульта управления, голосом, жестом и т.д.

Выполнение команды может заключаться в запуске заранее подготовленной программы движений робота или автоматическом проектировании роботом этой программы с последующим (или одновременным) ее выполнением.

Примером автоматического проектирования может служить метод инверсной кинематики, при котором задается начальная и конечная позиции робота, а «путь» перехода из одной позиции в другую рассчитывается автоматически.

Функциональная схема управления показана на рис. 3.

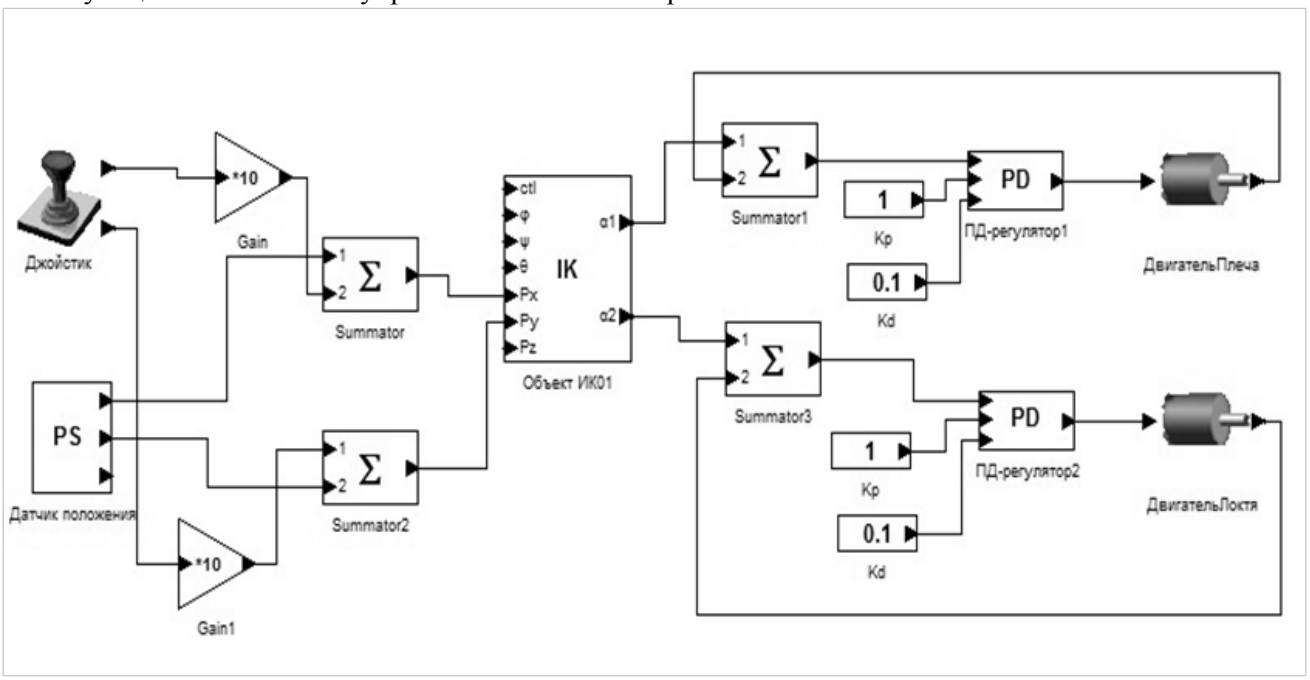


Рисунок 3 – Функциональная схема управления

В этой схеме управления представлено несколько функциональных блоков, соединенных между собой. На вход функциональной схемы поступают управляющие сигналы с элементов управления пульта, а на выходе вычисляются величины напряжений, которые подаются на электроприводы робота. Для полуавтоматического режима управления роботом используются следующие разработанные блоки функциональной схемы: блок датчика положения, блок инверсной кинематики и блок ПД-регулятора. Блок датчика положения возвращает трехмерные координаты текущего положения рабочего органа, которые вычисляются в подсистеме динамики. Блок инверсной кинематики с помощью метода покоординатного спуска вычисляет новые углы поворотов в шарнирах, которые затем передаются в блоки ПД-регуляторов.

ПД-регуляторы вычисляют напряжения, которые необходимо подать на электроприводы робота для реализации поворотов двигателей на углы, получаемые из блока инверсной кинематики. На рис. 4 показана функциональная схема управления плоским двухзвенным манипулятором в полуавтоматическом режиме. В ней блок «Датчик положения» передает текущее положение рабочего органа, а блок «Джойстик» - сигналы управления от джойстика виртуального пульта. Вычисленное новое положение рабочего органа передается в блок «Объект ИК», на выходе которого определяются требуемые углы поворота двигателей. Нужные напряжения на электроприводах формируются блоками ПД-регуляторов.

Апробация предложенных методов управления роботами в полуавтоматическом режиме

Апробация предложенных методов управления роботами в полуавтоматическом режиме проводилась на модели торсового антропоморфного робота. Рассматривались технологические операции захвата и перемещения объекта рукой робота. Рабочим органом являлась точка на запястье руки робота.

На рис. 4 показан дизайн выполнения операции захвата роботом контейнера КЭ «Биориск» на внешней поверхности МКС.

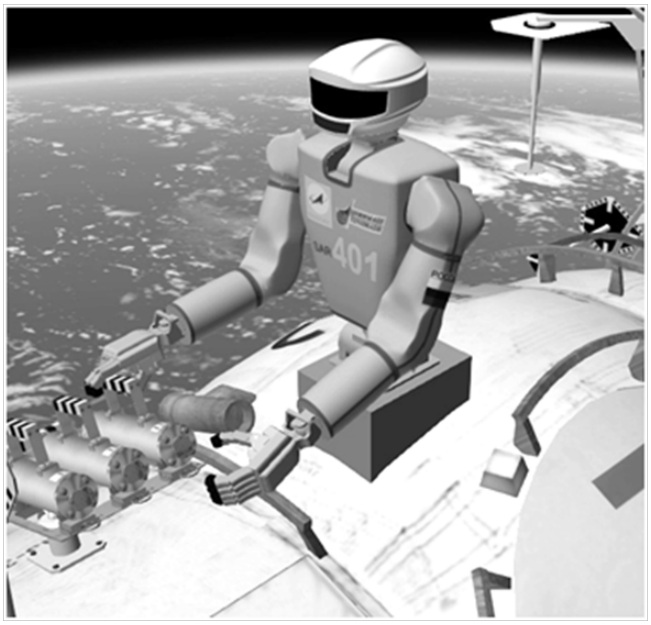


Рисунок 4 – Захват контейнера на внешней поверхности МКС

Дизайн антропоморфного робота выполнен специалистами ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН по макету антропоморфного робота SAR-401 (разработка ОАО «Андроидная техника»).

В вычислительном эксперименте подведение кисти руки осуществлялось в полуавтоматическом режиме, а захват – включением соответствующих двигателей пальцев кисти руки.

Базой проектирования послужила разработка ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН – система “GLView” [29].

Важной составляющей компонентой в системе “GLView”, позволяющей хранить информацию о способе выполнения манипуляции и ее визуализации для ЧО, является модуль работы со скриптовыми командами [22]. Скриптовая команда задается текстовой строкой, в которой указано назначение и тип команды, а также связанные с ней данные произвольного формата и размера. Команды в систему

могут поступать из текстовых конфигурационных файлов (скриптов), или формироваться отдельными модулями для передачи ядру системы, либо другим программным модулям.

Система визуализации в целом имеет широкий список поддерживаемых команд: системные команды, команды работы с материалами, команды управления узлами сцены, команды конфигурирования управления и т.д. Этот подход позволяет организовать эффективный обмен данными произвольного типа, а также сопоставить конкретным видам манипуляций соответствующие скрипты достаточно сложного состава.

Заключение

Одним из актуальных направлений экстремальной робототехники является применение роботов для выполнения технологических операций в условиях, опасных или вредных для деятельности человека. Примером является космическая робототехника, в рамках которой создаются манипуляционные роботы. Особый интерес в данной области исследований представляет использование антропоморфных роботов. Для управления такими роботами ЧО должен пройти обучение на тренажерах. Одним из значимых и завершающих этапов подготовки космонавтов к решению широкого круга задач профессиональной деятельности сегодня являются тренировки космонавтов на борту орбитальной станции в системах виртуального окружения, включающих виртуальные модели роботов в виртуальной среде. Это позволяет обеспечить поддержание навыков и формирование представлений человека о способах выполнения действий при управлении динамическими объектами и ведении пространственной ориентировки, что вполне правомерно рассматривать и применительно к предстоящим перспективным задачам космической робототехники, включая дистанционное управление моделями роботов в виртуальном окружении при манипуляциях с объектами внутри отсеков орбитальной станции.

Для улучшения ситуационной осведомленности и мониторинга действий робота в полуавтоматическом режиме в ИТК должны быть предусмотрены средства поддержания обратной связи по визуальному каналу и визуальные представления 3D сцены в разных системах координат, учитывающих информационные потребности человека при формировании внутреннего образа – представления о внешней среде.

1. Бронников С.В., Шевченко Л.Г., Рожкова И.А. Развитие технического и методического обеспечения бортовых тренировок экипажей по действиям при разгерметизации космической станции // Научные чтения памяти К.Э.Циолковского, 2004 г., Секция «К.Э. Циолковский и проблемы профессиональной деятельности космонавтов», Россия, г. Калуга, Государственный музей истории космонавтики им. К.Э. Циолковского. // Электронный ресурс: URL: http://readings.gmik.ru/lecture/2004-razvitie-tehnicheskogo-i-metodicheskogo-obespecheniya-bortovih-trenirovok-ekipazhey-po-deystviyam-pri-razgermetizatsii-kosmicheskoy-stantsii Доступ свободный, 12.03.2018.
2. Uhlig, Th. Uhlig Th., Roshani Fr.-C., Amodio C., Rovera A., Zekusic N., Helmholz H., Fairchild M. (2016) ISS emergency scenarios and a virtual training simulator for Flight Controllers. // Acta Astronautica (128), Seiten 513-520. Elsevier. DOI: 10.1016/j.actaastro.2016.08.001.
3. Микрин Е.А., Корвяков В.П., Климанов С.И. Разработка тренажера спуска корабля «Союз ТМА-М» для бортового лэптопа Международной космической станции // Вестник компьютерных и информационных технологий. - М.: Изд.: Издательский дом «Спектр». 2013. № 1(103). С.12-16.
4. Сальницкий В.П., Мясников В.И., Бобров А.Ф., Шевченко Л.Г., Дудукин А.В. Исследование надежности деятельности космонавта на различных этапах длительного космического полета (эксперимент «Пилот»). // Орбитальная станция «Мир». Космическая биология и медицина. (В 2-х тт.) Т. 2, Москва, 2002. С. 285-300.
5. Johannes B., Salnitski V., Dudukin A., Shevchenko L., Bronnikov S. Performance Assessment in the PILOT Experiment On Board Space Stations Mir and ISS //Aerosp Med Hum Perform. 2016 Jun; 87(6):534-44. doi: 10.3357/AMHP.4433.2016.
6. Бубеев Ю.А., Котровская Т.И., Счастливцева Д.В. Космический эксперимент «Пилот-Т» для оценки надежности работы космонавта // Электронный ресурс. URL: http://www.imbp.ru/WebPages/win1251/Science/articlies/2016/Pilot-T.pdf доступ свободный, дата 12.03.2018.

7. Гребенщиков А.В., Сапрыкин О.А. Космический эксперимент «Теледроид»: «Исследование возможностей использования дистанционно-управляемого антропоморфного робота для операционной поддержки деятельности космонавтов в условиях орбитального полета» // Электронный ресурс: сайт ЦНИИмаш. URl: knts.tsniimash.ru/ru/src/Conf_InfRes/ГРЕБЕНЩИКОВ_А_В-пер.pdf доступ свободный, дата 11.09.2017.
8. Гук М.Ю., Силиненко А.В. Контур-2: совместный российско-германский космический эксперимент по силомоментному управлению наземными роботами с борта МКС // Экстремальная робототехника. // Труды международной научно-технической конференции. – Санкт-Петербург: Изд-во «Политехника-сервис», 2014. С.59 – 64.
9. Ушаков И.Б., Поляков А.В., Усов В.М., Бояринцев В.В. Перспективы использования на пилотируемых космических аппаратах симуляционных технологий для практического освоения и поддержания в полете навыков выполнения космонавтами мероприятий неотложной медицинской помощи // Авиакосмическая и экологическая медицина. 2015. Т.49. №2. С.50-54.
10. Ушаков И.Б., Поляков А.В., Карпов А.А., Усов В.М. Медицинская робототехника как новый этап развития бортовых тренажеров и биотехнических систем на орбитальной станции // Труды международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника». Санкт-Петербург: Изд-во «Политехника-сервис», 2015. С. 43-53.
11. Усов В.М., Крючков Б.И., Карпов А.А., Кулаков Ф.М., Чернакова С.Э. Инженерно-психологический анализ технологий дополненной реальности для визуальной поддержки дистанционного управления роботом-манипулятором // Информация и космос. 2015. №4. С.58-67.
12. Крючков Б.И., Усов В.М., Чертополохов В.А. Инструментарий для эргономической оценки интерфейса «Человек-Робот» при телеуправлении антропоморфным манипулятором с использованием экзоскелета // Робототехника и искусственный интеллект: материалы IX Всероссийской научно-технической конференции с международным участием (г.Железногорск, 2 декабря 2017 г.) / под науч. ред. В.А. Углева. // Электрон. дан. (7 Мб). – Красноярск: ЛИТЕРА-принт, 2017. (248 с.) С.67-73.
13. Karpov A.A., Mikhaylyuk M.V., Usov V.M., Kryuchkov B.I. Virtual prototyping of Human-Machine Interaction for remote control of space autonomous manipulation robots based on augmented reality technology // IAC2016, Paper number IAC-16,B3,6-A5.3,7,x34571 URL: https://iafastro.directory/iac/archive/browse/IAC-16/B3/6-A5.3/34571/ Date: 21.11.3016.
14. Крючков Б.И., Михайлюк М.В., Усов В.М. Технологии моделирования для эргономического проектирования системы «космонавт – манипуляционный робот – рабочая среда» / // Материалы конференции «Управление в морских и аэрокосмических системах» (УМАС-2014). СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2014. (871 с.) С.367-377.
15. Крючков Б.И., Усов В.М. Создание моделей виртуальной реальности, как способ обучения космонавтов взаимодействию с роботом - помощником и как условие определения потенциальных областей его полезного применения // Робототехника и техническая кибернетика. 2013. №1(1). С.46-52.
16. Богданов А.А., Кутлубаев И.М., Пермяков А.Ф., Сычков В.Б. Антропоморфные роботы – составляющая научной аппаратуры орбитальных станций // Робототехника и искусственный интеллект: материалы VIII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием (г. Железногорск, 25 ноября 2016 г.) / под науч. ред. В.А. Углева. – Электрон. дан. (6,4 Мб). – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2016. (220 с.). С.71-80.
17. Богданов А.А., Кутлубаев И.М., Сычков В.Б. Перспективы создания антропоморфных робототехнических систем для работы в космосе // Пилотируемые полеты в космос. 2012. №1 (3). С.78-84.
18. Бурдин Б. В., Михайлюк М. В., Сохин И. Г., Торгашев М. А. Использование виртуальных 3D-моделей для экспериментальной отработки бортовых полетных операций, выполняемых с помощью антропоморфных роботов // Робототехника и техническая кибернетика. 2013. №1(1). С.42–46.
19. Сохин И.Г., Лончаков Ю.В., Сиволап В.А., Михайлюк М.В., Сычков В.Б. Экспериментальные эргономические исследования дистанционного взаимодействия космонавтов с антропоморфными

роботами помощниками с использованием технологий виртуального окружения. // Экстремальная робототехника. 2016. Т. 1. № 1. С. 415-422.
20. Михайлюк М.В., Омельченко Д.В., Страшнов Е.В. Командный и супервизорный режимы управления виртуальными роботами. // Вестник кибернетики. 2016. №4 (24). С. 67-72.
21. Михайлюк М.В. Виртуальные пульты управления. // Сб. докладов Международной научной конференции «Актуальные проблемы управления», Москва, РГГУ, 24 апреля 2014, С.63 – 67.
22. Михайлюк М.В., Торгашев М.А., Омельченко Д.В. Эргономичный голосовой интерфейс управления антропоморфным роботом // Программные продукты и системы, № 4, 2015, стр. 75-78.
23. Мальцев А.В., Михайлюк М.В. Эргономичный бесконтактный интерфейс управления моделью антропоморфного робота. // Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн (Материалы II Международной научно-практической конференции). 2016. С. 95-99.
24. Мальцев А.В., Михайлюк М.В., Крючков Б.И., Усов В.М. Жестово-голосовой интерфейс космонавта с группой автономных мобильных роботов для экстренного предотвращения их коллизий. // Информационные технологии в управлении (ИТУ-2016). Материалы 9-й конференции по проблемам управления. 2016. С. 815-823.
25. Крючков Б.И., Михайлюк М.В., Усов В.М. Голосовые команды для дистанционного управления антропоморфными роботами на основе метода «обучение показом движения». // Пилотируемые полеты в космос. 2015. № 4 (17). С. 56-70.
26. Li-Chun Tommy Wang and Chih Cheng Chen. (1991) A combined optimization method for solving the inverse kinematics problems of mechanical manipulators. IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 7, no. 4, 1991, p. 489-499.
27. Kenwright B. Inverse kinematics – Cyclic Coordinate Descent (CCD). // Journal of Graphics Tools, vol. 16, no. 4, 2012, p. 177-217.
28. Страшнов Е.В., Михайлюк М.В. Моделирование полуавтоматического режима управления манипуляционными роботами в системах виртуального окружения // Вестник кибернетики. 2017. №4(28). С.189-196.
29. Михайлюк М.В., Торгашев М.А. Система «GLView» визуализации для моделирующих комплексов и систем виртуальной реальности // Вестник РАЕН. – 2011. – Т.11, №2. – С. 20–28.

I.G. Sokhin, A.A. Kuritsyn

PROBLEMS OF INTERACTION OF CREWS WITH ANTHROPOMORPHOUS ROBOTIC ASSISTANTS IN FUTURE SPACE MISSIONS

Yu.A. Gagarin Research & Test Cosmonaut Training Center,
Star City, Moscow region
i.sokhin@gctc.ru, a.kuricyn@gctc.ru

Abstract

Anthropomorphous robotic systems will be needed to support crews for performing flight operations during future deep space exploration. Such anthropomorphous robotic assistants (RAs) possess some advantages over other robotic systems. In particular, they can be remotely controlled in a master-slave mode when it is required to perform especially precise manipulations, peculiar to humans. When creating and using anthropomorphous robotic assistants during space missions, issues of ensuring an efficient interaction of expedition crew members and robots become topical. The paper considers the key ergonomic problems of the creation and the use of RAs and, also, presents the results of already performed experimental studies of the processes of controlling RAs in a master-slave mode in a virtual environment.

Keywords: anthropomorphous robotic assistant, exoskeleton, experimental ergonomic studies, virtual reality, flight operations, remote control, master-slave control mode.

И.Г. Сохин, А.А. Курицын

ПРОБЛЕМЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭКИПАЖЕЙ ПЕРСПЕКТИВНЫХ КОСМИЧЕСКИХ МИССИЙ С АНТРОПОМОРФНЫМИ РОБОТАМИ-ПОМОЩНИКАМИ

Научно-исследовательский испытательный центр
подготовки космонавтов имени Ю.А. Гагарина,
Звездный городок, Московская обл.
i.sokhin@gctc.ru, a.kuricyn@gctc.ru

Аннотация

В ходе освоения дальнего космоса для поддержки деятельности экипажей при выполнении полетных операций потребуется использование антропоморфных робототехнических систем. Такие антропоморфные роботы-помощники экипажей (РПЭ) имеют некоторые преимущества по сравнению с другими робототехническими конструкциями. В частности, ими можно дистанционно управлять РПЭ в копирующем режиме для выполнения особо точных манипуляций, свойственных человеку. При создании и применении антропоморфных роботов-помощников экипажей космических экспедиций актуальными становятся проблемы эффективной организации взаимодействия с ними космонавтов. В докладе рассматриваются основные эргономические проблемы, возникающие при создании и применении РПЭ, а также представлены результаты уже проведенных экспериментальных исследований процессов дистанционного управления антропоморфным РПЭ в виртуальной среде.

Ключевые слова: антропоморфный робот-помощник, экзоскелет, экспериментальные эргономические исследования, виртуальная реальность, полетная операция, дистанционное управление, копирующий режим управления

Введение

В настоящее время в перспективных программах освоения дальнего космоса, осуществления межпланетных полетов на Луну, к Марсу и ближайшим астероидам, большое значение придается использованию робототехнических систем космического назначения [1]. Одним из направлений развития робототехнических систем в пилотируемой космонавтике является разработка так называемых антропоморфных роботов-помощников экипажей (РПЭ), т.е. роботов, подобных по построению телу человека и обладающих аналогичными кинематическими характеристиками. Такие антропоморфные роботы имеют некоторые преимущества по сравнению с другими типами робототехнических систем при выполнении высокоточных полетных операций в уже созданных человеко-машинных интерфейсах пилотируемых космических комплексов. Антропоморфные роботы-помощники экипажей могут функционировать как в автономном автоматическом режиме, так управляться дистанционно в копирующем режиме. Копирующий режим дистанционного управления РПЭ наиболее эффективен в ситуациях неопределенности, когда целеполагание и алгоритм деятельности должен быть гибко адаптирован к изменяющимся внешним условиям. Наилучшим образом к такому виду деятельности приспособлен человек. Поэтому использование преимуществ человека может быть реализовано в копирующем режиме дистанционного управления роботом с использованием экзоскелета [2-5]. В качестве человека-оператора, управляющего РПЭ, может быть член экипажа или оператор наземного Центра управления полетами.

В современных условиях в связи с отсутствием опыта применения антропоморфных роботов-помощников экипажей в космической деятельности актуальность приобретают проблемы безопасного и эффективного взаимодействия космонавтов с РПЭ. По нашему мнению, эти проблемы должны решаться комплексно в ходе эргономического сопровождение процессов жизненного цикла их создания, испытаний и эксплуатации. Эргономическое сопровождение необходимо, в частности, для распределения функций между космонавтом и РПЭ, обоснования эргономических требований к РПЭ, включения этих требований в состав технических заданий на выполнение опытно-конструкторских работ по созданию образцов РПЭ, проведение эргономической экспертизы и многое другое. В конечном итоге эргономическое сопровождение должно обеспечить оптимизацию совместной деятельности космонавта и РПЭ в условиях космического полёта [6, 7].

Особенности взаимодействия космонавта с антропоморфным роботом-помощником при выполнении полетных операций

Для анализа взаимодействия космонавта с РПЭ рассматривается сложная эргатическая система «космонавт - антропоморфный РПЭ - профессиональная среда деятельности», структура которой представлена на рис.1 [7].

Рисунок 1 – Структура ЭС «космонавт-РПЭ-профессиональная среда деятельности»

Компонентами рассматриваемой ЭС являются космонавт-оператор, антропоморфный робот, представляющий собой сложную техническую систему и профессиональная среда деятельности, представляющая собой некую среду, в которой находятся космонавт-оператор, антропоморфный робот, другие технические объекты (системы) и в которой осуществляется профессиональная деятельность космонавт-оператора при выполнении полетных операций.

Особенностью функционирования данной эргатической системы является то обстоятельство, что при выполнении полетных операций космонавт не напрямую взаимодействует с профессиональной средой, а посредством управляемого им РПЭ. Это обуславливает появление ряда проблем, возникающих как при создании РПЭ, так и их применении космонавтами в своей деятельности. Среди них можно выделить следующие:

4) Обоснование полетных задач и операций, которые целесообразно передать РПЭ.

5) Рациональное распределение функций между человеком-оператором и РПЭ.

6) Построение рабочего места человека-оператора и эффективного человеко-машинного интерфейса.

7) Обоснование требований по обеспечению безопасности при работе с РПЭ.

8) Обоснование требований к средствам подготовки космонавтов для работы с РПЭ.

9) Проведение опережающих эргономических исследований и экспертизы технических решений по использованию РПЭ космонавтами.

Эргономическое сопровождение создания и применения робота-помощника экипажа

Решение вышеуказанных проблем диктует необходимость проведения комплекса работ по эргономическому сопровождению процессов их создания, испытаний и эксплуатации [7, 8]. Мы видим следующие направления работ по эргономическому сопровождению:

− проведение опережающих исследований ЭС «космонавт-РПЭ-среда»;

– экспериментальная отработка и «обучение» роботов выполнению полетных операций;

– эргономическая экспертиза на всех этапах создания РПЭ;

– эргономическая оценка применения РПЭ в ходе наземных, летных испытаний и эксплуатации.

Для решения задач эргономического сопровождения, особенно на этапе проведения экспериментальных исследований взаимодействия космонавтов с РПЭ, могут найти эффективное применение технологии виртуального окружения [8]. Их использование позволяет проводить исследования на виртуальных интерактивных 3D моделях роботов и окружающей среды без проведения натурных экспериментов с дорогостоящими макетами роботов. При этом на текущем уровне развития технологий можно обеспечить высокую достоверность виртуального моделирования как в части визуальных, так и динамических характеристик.

Общая схема работы с моделью выглядит следующим образом [5, 8]. Оператор надевает специальный костюм (т.н. задающее устройство копирующего типа - экзоскелет), который позволяет с высокой точностью фиксировать движения человека. Управляющие сигналы от экзоскелета поступают в систему моделирования, где вычисляются углы поворота и координаты отдельных звеньев РПЭ. Результирующие координаты и углы передаются в систему 3D моделирования, которая синтезирует на экране монитора (или большом настенном экране) в моно или стерео режиме изображение робота с текущими положениями его звеньев, а также окружающую обстановку. Ориентируясь на полученное изображение, оператор выполняет необходимые движения, которые в реальном масштабе времени (т.е. с частотой не менее 25 кадров в секунду) отображаются на экране. Таким образом, у оператора возникает ощущение непрерывного движения модели робота, повторяющей движения оператора. Если в виртуальной сцене задать инерционные характеристики робота, его звеньев и окружающих объектов (массы, тензоры инерции и т.д.), то можно моделировать реальную динамику работы робота. К ней относятся обработка столкновений частей робота с окружающими объектами (коллизии), захват и манипуляции с объектами, воздействие на робота другими объектами и т.д. На виртуальной сцене можно моделировать различные повреждения, нештатные ситуации, стратегии выполнения операций и т.д.

Технологии виртуальной реальности также эффективны и для создания интерфейсов взаимодействия «космонавт-робот». Примерами являются режимы индуцированной и дополненной виртуальной реальности [8]. Режим индуцированной виртуальной реальности заключается в том, что в процессе работы реального робота в космосе все параметры его движений (углы поворота звеньев) передаются по телеметрии в масштабе реального времени в виртуальную модель, находящуюся на Земле или внутри космического аппарата. По этим данным виртуальная модель будет в точности повторять движения реального робота. Таким образом, космонавт может осуществлять дополнительный визуальный контроль выполняемых операций на виртуальной модели в реальном масштабе времени. При этом ему доступны произвольные ракурсы наблюдения, в том числе и те, которые отсутствуют в реальности. Это позволяет повысить эффективность использования антропоморфного робота при выполнении полетных операций. В дополненной виртуальной реальности производится совмещение реальной обстановки, наблюдаемой с помощью видеокамер, с виртуальной сценой. Это предоставляет дополнительные возможности контроля действий робота со стороны инструктора.

Экспериментальные исследования процесса дистанционного управления роботом-помощником с помощью экзоскелета

На базе Центра подготовки космонавтов имени Ю.А. Гагарина в 2015 году впервые были проведены экспериментальные эргономические исследования дистанционного управления космонавтом антропоморфным роботом в копирующем режиме [9-11]. При этом для выполнения ряда тестовых операций использовались натурный образец задающего устройства копирующего типа (ЗУКТ - экзоскелета) разработки «НПО «Андроидная техника», шлем оператора Oculus Rift DK2 и виртуальные 3D-модели антропоморфного робота и окружающей среды, совместной разработки «НПО «Андроидная техника» и НИИ системных исследований РАН.

На данном этапе исследований ставились следующие задачи:

1) оценка возможности дистанционного управления 3-D моделью антропоморфного робота в копирующем режиме;

2) оценка качества реализации «эффекта присутствия» при виртуальном управлении роботом;

3) оценка физических ограничений (стеснённости, скованности и др.), накладываемых на оператора задающим устройством копирующего типа (ЗУКТ);

4) оценка восприятия оператором степени соответствия собственных движений и движений манипуляторов робота;

5) оценка комфортности и утомляемости оператора при использовании шлема виртуальной реальности;

6) разработка экспертных предложений и рекомендаций по улучшению характеристик аппаратно-программного комплекса управления роботом и 3D-моделей.

В эксперименте принимали участие космонавты и квалифицированные инструкторы, проводящие подготовку космонавтов по динамическим операциям (всего более 30 человек). На операторов-испытателей накладывались задающее устройство, шлем отображения виртуальных сцен и множество медицинских датчиков (рис. 2). Тестовые задания операторам включали операции взятия и перемещения с помощью робота предметов на рабочем столе, а также штатные полетные операции, выполняемые космонавтами внутри гермоотсеков Международной космической станции и на её поверхности в открытом космосе. В среднем непрерывная работа каждого оператора в виртуальном окружении составляла около одного часа.

Рисунок 2 – Оператор дистанционно управляет действиями виртуального робота

Экспериментальные исследования носили комплексный характер – оценивался комплекс показателей психофизиологического состояния работоспособности операторов-испытателей до, во время и после проведения экспериментов, также оценивались показатели качества управления роботом (рис. 3). В ходе исследований была разработана уникальная методика экспериментальных исследований, основанная на анализе деятельности операторов, условий выполнения ими поставленных задач, затруднений, возникающих в процессе их деятельности, результатов физиологических и психологических исследований операторов. Для отбора релевантных частных методик оценивания был использован теоретико-методологический анализ научной литературы, статистический анализ данных, наблюдения, опросы, экспертная оценка, психологическое тестирование.

Рисунок 3 – Проведение комплексных исследований по оценке возможностей космонавта дистанционно выполнять тестовые операции с помощью виртуального робота

После завершения серии экспериментов и статистической обработки их результатов были сделаны следующие выводы.

1. Показана принципиальная возможность дистанционного управления мобильным роботом в копирующем режиме при использовании исследуемого комплекта ЗУКТ с эмуляцией выполняемых сценариев взаимодействия 3D-моделей РПЭ и окружающей обстановки.
2. Проведенные исследования не подтвердили ряд публикаций о побочных реакциях организма со стороны зрительного анализатора, проприоцептивной системы, вестибулярной системы, мышечного аппарата, которые мешали бы выполнению поставленной задачи виртуального управления роботом. По предварительным оценкам при управлении виртуальной 3D моделью робота с помощью устройства копирующего типа и шлема виртуальной реальности, у операторов не возникало побочных реакций организма, препятствующих выполнению заданий.
3. Установлено наличие ряда недостатков (технических, технологических, эргономических), значительно влияющих на характеристики управляемости программно-аппаратного комплекса рабочего места оператора РПЭ.
4. В целом оценка «эффекта присутствия» положительная: оператор ощущает себя внутри ситуации, выступает активным звеном системы и процесса управления. При работе с РПЭ преобладающей информацией являются собственные представления и визуальный ряд. Ввиду ряда ограничений моделей (отсутствие очувствления, искажение геометрических размеров объектов, недостатки используемого шлема виртуальной реальности, недостаточно полное моделирование физических условий и др.) «эффект присутствия» оказался ниже ожидаемого.

Заключение

Для перспективных программ освоения космического пространства потребуется широкое использование робототехнических систем различного типа и назначения. Для поддержки деятельности межпланетных экспедиций найдут применение антропоморфные роботы-помощники экипажей (РПЭ). При создании и применении РПЭ возникает ряд эргономических проблем взаимодействия с ними космонавтов. Поэтому представляются весьма актуальным проведение эргономического сопровождения создания и применения РПЭ. Проведена серия экспериментальных исследований дистанционного управления антропоморфным роботом SAR-401 в виртуальной среде с использованием программно-аппаратного комплекса рабочего места оператора, управляющего РПЭ с использованием натурного экзоскелета и виртуальных 3D-моделей РПЭ и окружающей обстановки. В ходе экспериментальных исследований опробован методический подход к комплексному оцениванию пользовательских характеристик, включающему мониторинг и оценку физиологического,

психологического состояний оператора и качества управления. Получен ряд новых результатов относительно характеристик эргатической системы «космонавт - робот - профессиональная среда деятельности» и разработаны предложения по усовершенствованию характеристик программно-аппаратного комплекса рабочего места оператора.

1. Лончаков Ю.В., Сохин И.Г. Роботы в пилотируемой космонавтике: опыт применения и дальнейшие перспективы»// Материалы XLIX научных чтений памяти К.Э. Циолковского (Калуга, 2014 г.).
2. Сохин И.Г., Сорокин В.Г., Крючков Б.И. Применение антропоморфных робототехнических систем для поддержки деятельности экипажей перспективных пилотируемых комплексов// Тезисы докладов 8 Международного аэрокосмического конгресса (Москва, 2015 г.) - с.400-405.
3. Сохин И.Г., Сорокин В.Г. Возможные области применения антропоморфных роботов-помощников экипажей в отсеках перспективных космических комплексов// Научный журнал «Пилотируемые полеты в космос». - 2015. - №4(17). - с. 71-79.
4. Богданов А.А., Кутлубаев И.М., Сычков В.Б. Перспективы создания антропоморфных робототехнических систем для работы в космосе// Научный журнал «Пилотируемые полеты в космос». - 2012. - №1(3). - с. 78-84.
5. Лончаков Ю.В., Сиволап В.А., Сохин И.Г. Эргономические проблемы создания и применения антропоморфных роботов-помощников экипажей перспективных космических миссий//Труды международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника». – СПб, 2015. - с. 191-199.
6. Бурдин Б.В., Михайлюк М.В., Сохин И.Г., Торгашев М.А. Использование виртуальных 3D-моделей для экспериментальной отработки полетных операций, выполняемых с помощью антропоморфных роботов/ Труды 7-го Международного симпозиума «Экстремальная робототехника – робототехника для работы в условиях опасной окружающей среды». – СПб, 2015. - с. 219-229.
7. Сохин И.Г., Сорокин В.Г. Системный подход к обоснованию эргономических требований к роботу-помощнику экипажа пилотируемого космического комплекса// Научный журнал «Пилотируемые полеты в космос». - 2016. - №1(18). - с. 89-98.
8. Михайлюк М.В., Сохин И.Г., Прилипко А.А. Использование индуцированной виртуальной реальности для повышения безопасности работы роботов в космическом пространстве/ // Труды XXIV Международной научной конференции «Проблемы управления безопасностью сложных систем». - Москва, 2016. с. 199-201.
9. Сохин И.Г., Лончаков Ю.В., Сиволап В.А., Михайлюк М.В., Сычков В.Б. Эргономическое исследование дистанционного взаимодействия космонавтов с антропоморфными роботами помощниками// Научно-технический журнал «Робототехника и техническая кибернетика». – 2016. - №3(12). - с. 18-22.
10. Ю.В. Лончаков, В.А. Сиволап, И.Г. Сохин, В.Г. Сорокин, Б.В. Бурдин Эргономические исследования взаимодействия космонавтов с антропоморфными роботами помощниками// Материалы 51-х научных чтений памяти К.Э. Циолковского «Идеи К.Э. Циолковского в инновациях науки и техники» (Калуга, 2016 г.) .- с. 315-316.
11. I.G.Sokhin, Andrey Kuritsin, Yu.V. Lonchakov, M.B.Kornienko, V.A. Sivolap, A.A.Bogdanov, V.B.Sychkov, M.V. Mikhailyuk. Application of virtual reality technologies for ergonomic studies of interaction between cosmonauts and humanoid robotic assistant// 67nd International Astronautical Congress, IAC Paper (Guadalajara, Mexico, 2016). – IAC-16.A5.3.5x32287.

P.P. Belonozhko

SYNTHESIS OF PROGRAM MOVEMENTS OF THE ROBOTIZED SPACE MODULE WITH THE ACCOUNT OF OWN DYNAMICS OF THE REDUCED SYSTEM

Bauman Moscow State Technical University, Moscow
byelonozhko@mail.ru

П.П. Белоножко

СИНТЕЗ ПРОГРАММНЫХ ДВИЖЕНИЙ РОБОТИЗИРОВАННОГО КОСМИЧЕСКОГО МОДУЛЯ С УЧЕТОМ СОБСТВЕННОЙ ДИНАМИКИ ПРИВЕДЕННОЙ СИСТЕМЫ

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва
byelonozhko@mail.ru

Введение

Рассматривается [1–6] класс монтажно-сервисных роботизированных космических модулей (МСРКМ), которые оснащены манипулятором (манипуляторами), способны самостоятельно перемещаться в космическом пространстве и приспособлены для контактного взаимодействия с монтируемыми (обслуживаемыми) объектами. Характерной особенностью таких модулей является наличие динамических режимов, в которых перемещение груза относительно основания при помощи манипулятора сочетается с перемещением основания. При этом возможны собственные инерционные движения по внутренним степеням свободы МСРКМ, возникающие при отсутствии как внешних по отношению к МСРКМ сил и моментов, так и управляющих воздействий в шарнирах манипулятора. Исследование этих движений представляет интерес с точки зрения реализации важного принципа организации движения роботов – обеспечения соответствия свободных и вынужденных движений манипулятора [7–9]. При этом эффективным оказывается введение в рассмотрение некоторой приведенной системы, уравнения динамики которой при определенных условиях могут быть получены в форме уравнений Рауса [10]. В докладе рассмотрены вопросы синтеза программных движений для поставленной в соответствие МСРКМ конкретного вида нелинейной колебательной приведенной системы.

Постановка задачи. Исходная и приведенная системы

В качестве исходной рассмотрим свободную в инерциальном пространстве систему двух твердых тел (основания и груза), связанных идеальным одностепенным вращательным шарниром, совершающую плоское движение. Массы тел – m_1 и m_2, J_1 и J_2 – моменты инерции тел относительно их центров масс, l_1 и l_2 – расстояния от центров масс тел до шарнира. Рассматривается движение по отношению к не вращающейся система координат XCY с началом в центре масс системы C, которая в отсутствие действия на систему внешних сил и моментов будет инерциальной. Положение системы по отношению к XCY определяется углом φ_1, характеризующим абсолютное движение основания, и шарнирным углом q, характеризующим движение груза относительно основания. В шарнире приложен управляющий момент M. Данная расчетная схема может быть поставлена в соответствие МСРКМ с одной управляемой степенью подвижности манипулятора (например, в режиме, когда остальные шарниры МСРКМ, имеющего соответствующую конфигурацию, зафиксированы).

Выражение для кинетической энергии исходной системы как квадратичной формы независимых обобщенных координат φ_1 и q имеет вид

$$T = \frac{1}{2}\dot{\varphi}_1^{\,2}\left(J_1 + J_2 + \tilde{m}l_1^{\,2} + \tilde{m}l_2^{\,2} + 2\tilde{m}l_1l_2\cos q\right) + \\ + \dot{\varphi}_1\dot{q}\left(J_2 + \tilde{m}l_2^{\,2} + \tilde{m}l_1l_2\cos q\right) + \frac{1}{2}\dot{q}^2\left(J_2 + \tilde{m}l_2^{\,2}\right), \tag{1}$$

где $\tilde{m} = \dfrac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}$.

Обозначим

$$\gamma_1 = J_1 + \tilde{m} l_1^{\,2}, \gamma_2 = J_2 + \tilde{m} l_2^{\,2},\ \gamma_3 = \tilde{m} l_1 l_2. \tag{2}$$

С учетом обозначений (2) выражение (1) примет вид

$$T = \frac{1}{2}\dot{\varphi}_1^{\,2}\left(\gamma_1 + \gamma_2 + 2\gamma_3 \cos q\right) + \dot{\varphi}_1 \dot{q}\left(\gamma_2 + \gamma_3 \cos q\right) + \frac{1}{2}\dot{q}^2 \gamma_2 . \tag{3}$$

В отсутствие внешних сил и моментов координата q является позиционной, а координата φ_1 – циклической. Имеет место циклический интеграл

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_1} = \dot{\varphi}_1\left(\gamma_1 + \gamma_2 + 2\gamma_3 \cos q\right) + \dot{q}\left(\gamma_2 + \gamma_3 \cos q\right) = L = const\,, \tag{4}$$

где L – кинетический момент системы.

В [4–6] показано, что в отсутствие внешних сил и моментов исходной системе может быть поставлена в соответствие приведенная нелинейная колебательная система, динамика управляемого движения которой описывается независимым дифференциальным уравнением. Таким образом, исследование вопроса об управлении движением груза относительно основания сводится к исследованию вопроса об управлении движением приведенной системы.

Кинетическая энергия приведенной системы

$$T^* = \frac{1}{2}\frac{\gamma_1 \gamma_2 - \gamma_3^{\,2}\cos^2 q}{\gamma_1 + \gamma_2 + 2\gamma_3 \cos q}\dot{q}^2 . \tag{5}$$

Потенциальная энергия приведенной системы

$$\Pi^* = \frac{1}{2}\frac{1}{\gamma_1 + \gamma_2 + 2\gamma_3 \cos q} L^2 - \frac{1}{2}\frac{1}{\gamma_1 + \gamma_2 + 2\gamma_3} L^2 . \tag{6}$$

Динамика приведенной системы описывается уравнением Лагранжа 2 рода

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial (T^* - \Pi^*)}{\partial \dot{q}}\right) - \frac{\partial (T^* - \Pi^*)}{\partial q} = M\ . \tag{7}$$

Подставляя (5) и (6) в (7), получим

$$\ddot{q}\frac{\gamma_1 \gamma_2 - \gamma_3^{\,2}\cos^2 q}{\left(\gamma_1 + \gamma_2 + 2\gamma_3 \cos q\right)} + \dot{q}^2 \frac{\gamma_3 \sin q\left(\gamma_1 + \gamma_3 \cos q\right)\left(\gamma_2 + \gamma_3 \cos q\right)}{\left(\gamma_1 + \gamma_2 + 2\gamma_3 \cos q\right)^2} + L^2 \frac{\gamma_3 \sin q}{\left(\gamma_1 + \gamma_2 + 2\gamma_3 \cos q\right)^2} = M . \tag{8}$$

Полная энергия приведенной системы

$$E^* = T^* + \Pi^* . \tag{9}$$

Из (5), (6) и (8) легко видеть, что приведенная система есть нелинейная колебательная система. Минимум потенциальной энергии Π^* приведенной системы имеет место при $q = 0$ (шарнир расположен на прямой, проходящей через центры масс тел), данное положение системы является

«нижним» положением устойчивого равновесия, в котором потенциальная энергия равна нулю, полная энергия равна кинетической. Максимум потенциальной энергии Π^* приведенной системы имеет место при $q = \pi$, данное положение системы является «верхним» положением неустойчивого равновесия, в котором кинетическая энергия равна нулю, полная энергия равна потенциальной.

В случае отсутствия управляющего воздействия в шарнире ($M = 0$) имеют место собственные баллистические движения приведенной системы. Заданием $q^{(0)}$ и $\dot{q}^{(0)}$ в соответствии с (5) и (6) определяется значение полной энергии приведенной системы $E^{*(0)}$, в силу условия $M = 0$ остающееся постоянным. В этом случае выражение (9) представляет собой уравнение семейства фазовых траекторий уравнения (8) для случая $M = 0$ собственных баллистических движений приведенной системы. Общий вид фазового портрета приведен на рис. 1.

Как видно из рис. 1, могут быть выделены два вида собственных движений: колебания и круговращения. Соответствующие группы фазовых траекторий разделены сепаратрисой. Лимитационному движению по сепаратрисе соответствует значение полной энергии приведенной системы

$$E_S^* = \Pi_{\max}^* = \frac{1}{2}\frac{1}{\gamma_1 + \gamma_2 - 2\gamma_3}L^2 - \frac{1}{2}\frac{1}{\gamma_1 + \gamma_2 + 2\gamma_3}L^2. \qquad (10)$$

В общем случае $M \neq 0$ изображенные на рис. 1 фазовые траектории можно интерпретировать как линии уровня поверхности энергии $E^*(\dot{q}, q)$.

Кинетическая энергия исходной системы может быть представлена в форме

$$T = T^* + \Pi^* + T_L. \qquad (11)$$

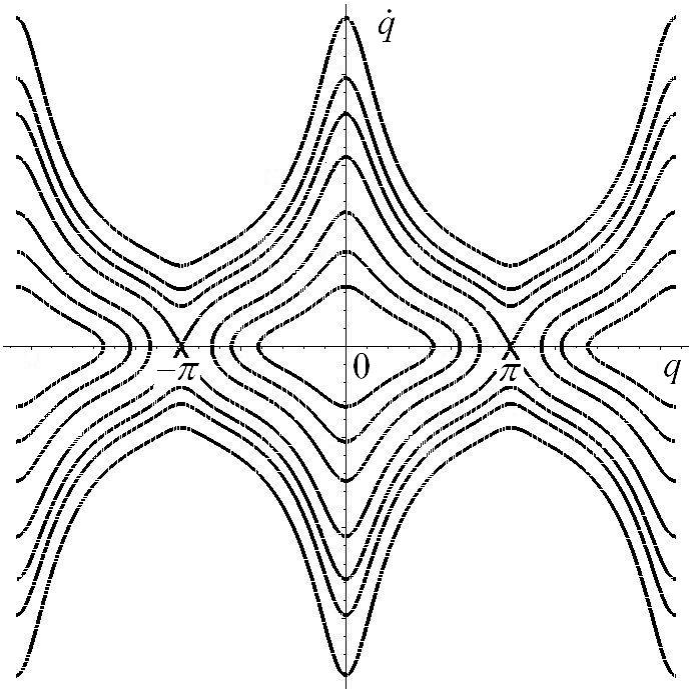


Рисунок 1 – семейство фазовых траекторий для случая собственных баллистических движений приведенной системы ($M = 0$)

Последнее слагаемое (11) есть постоянная величина, обусловленная наличием ненулевого кинетического момента L системы, который не может быть изменен за счет управляющего момента M:

$$T_L = \frac{1}{2}\frac{1}{\gamma_1+\gamma_2+2\gamma_3}L^2. \tag{12}$$

В случае, если полная энергия (9) приведенной системы равна нулю (приведенная система покоится в «нижнем» положении устойчивого равновесия, т.е. $q=0$ и $\dot{q}=0$), кинетическая энергия исходной системы есть энергия вращения твердого тела, имеющего момент инерции $(\gamma_1+\gamma_2+2\gamma_3)$ со скоростью $\dot{\varphi}_1^{(0)}$, обеспечивающей требуемое значение L

$$\begin{aligned} \dot{\varphi}_1^{(0)} &= \frac{L}{(\gamma_1+\gamma_2+2\gamma_3)} = const, \\ T_L &= \frac{1}{2}(\gamma_1+\gamma_2+2\gamma_3)\dot{\varphi}_1^{(0)^2} = const. \end{aligned} \tag{13}$$

Оценка энергетических затрат на управление. Критерий оптимальности

Рассмотрим производную от полной энергии приведенной системы (9) по времени

$$\begin{aligned} &\dot{E}^* = \frac{d}{dt}E^* = \frac{d}{dt}(T^*+\Pi^*) = \\ &= \frac{d}{dt}\left(\frac{1}{2}\frac{\gamma_1\gamma_2-\gamma_3^{\,2}\cos^2 q}{\gamma_1+\gamma_2+2\gamma_3\cos q}\dot{q}^2+\frac{1}{2}\frac{1}{\gamma_1+\gamma_2+2\gamma_3\cos q}L^2-\frac{1}{2}\frac{1}{\gamma_1+\gamma_2+2\gamma_3}L^2\right) = \\ &= \ddot{q}\dot{q}\frac{\gamma_1\gamma_2-\gamma_3^{\,2}\cos^2 q}{(\gamma_1+\gamma_2+2\gamma_3\cos q)}+\dot{q}^3\frac{\gamma_3\sin q(\gamma_1+\gamma_3\cos q)(\gamma_2+\gamma_3\cos q)}{(\gamma_1+\gamma_2+2\gamma_3\cos q)^2}+L^2\dot{q}\frac{\gamma_3\sin q}{(\gamma_1+\gamma_2+2\gamma_3\cos q)^2}. \end{aligned} \tag{14}$$

С учетом (8) можем записать (14) в виде

$$\dot{E}^* = M\dot{q}\,. \tag{15}$$

Таким образом, элементарное приращение полной энергии приведенной системы за бесконечно малый промежуток времени равно работе управляющего момента на бесконечно малом перемещении, совершенном системой за тот же промежуток времени

$$dE^* = \dot{E}^*dt = M\dot{q}dt = Mdq\,. \tag{16}$$

Из (15) очевидно, что в случае сонаправленности управляющего момента и скорости приведенной системы (M и $\dot{q}$ имеют одинаковый знак) производная (15) положительна, элементарное приращение полной энергии (16) за бесконечно малый промежуток времени положительно, управляющий момент совершает положительную элементарную работу, «разгоняя» систему и увеличивая ее полную энергию. Если направления управляющего момента и скорости приведенной системы противоположны (M и $\dot{q}$ имеют различные знаки) производная (15) отрицательна, элементарное приращение полной энергии (16) за бесконечно малый промежуток времени отрицательно, управляющий момент совершает отрицательную элементарную работу, «тормозя» систему и уменьшая ее полную энергию.

Рассмотрим управляемое движение системы в течение некоторого промежутка времени

$$t_0 \le t \le t_2\,. \tag{17}$$

При этом промежуток (17) состоит из двух промежутков, на первом из которых производная от полной энергии приведенной системы положительна, а на втором – отрицательна:

$$\dot{E}^* > 0,\ t_0 \le t < t_1,$$
$$\dot{E}^* < 0,\ t_1 < t \le t_2. \tag{18}$$

Очевидно, что приращения полной энергии на каждом из рассматриваемых промежутков, равны соответствующим значениям механической работы управляющего момента

$$\Delta E_{01}{}^* = \int_{t_0}^{t_1} \dot{E}^* dt = E^*(t_1) - E^*(t_0) = \int_{t_0}^{t_1} M\dot{q}dt > 0,$$
$$\Delta E_{12}{}^* = \int_{t_1}^{t_2} \dot{E}^* dt = E^*(t_2) - E^*(t_1) = \int_{t_1}^{t_2} M\dot{q}dt < 0. \tag{19}$$

При этом, в силу допущений (18)

$$\left|\Delta E_{01}{}^*\right| = \left|\int_{t_0}^{t_1} \dot{E}^* dt\right| = \int_{t_0}^{t_1} \left|\dot{E}^*\right| dt = \left|E^*(t_1) - E^*(t_0)\right| = \left|\int_{t_0}^{t_1} M\dot{q}dt\right| = \int_{t_0}^{t_1} \left|M\dot{q}\right| dt,$$
$$\left|\Delta E_{12}{}^*\right| = \left|\int_{t_1}^{t_2} \dot{E}^* dt\right| = \int_{t_1}^{t_2} \left|\dot{E}^*\right| dt = \left|E^*(t_2) - E^*(t_1)\right| = \left|\int_{t_1}^{t_2} M\dot{q}dt\right| = \int_{t_1}^{t_2} \left|M\dot{q}\right| dt. \tag{20}$$

Будем полагать, что устройство привода, создающего управляющий момент, не предполагает возможность рекуперации энергии, привод расходует энергию необратимо, и расход энергии на управление определяется суммой абсолютных значений механической работы управляющего момента для участков, на каждом из которых зависимость полной энергии (9) от времени есть монотонная функция. Тогда качество управления естественно оценивать [9] функционалом вида

$$J(t_0, t_k) = \int_{t_0}^{t_k} \left|M\dot{q}\right| dt. \tag{21}$$

Оптимальным в смысле минимизации энергетических затрат будет управление $M(t)$, обеспечивающее минимум функционала (21).

Для рассматриваемого случая (18) функционал (21), очевидно, будет равен

$$J(t_0, t_2) = \int_{t_0}^{t_2} \left|M\dot{q}\right| dt = \left|\Delta E_{01}{}^*\right| + \left|\Delta E_{12}{}^*\right| > \left|\int_{t_0}^{t_2} \dot{E}^* dt\right| = \left|\int_{t_0}^{t_2} M\dot{q}dt\right| = \left|E^*(t_2) - E^*(t_0)\right|. \tag{22}$$

Поскольку произвольное управляемое движение может быть разбито на конечное число участков рассматриваемого типа, интеграл (21) может быть оценен снизу следующим образом

$$J(t_0, t_k) = \int_{t_0}^{t_k} \left|M\dot{q}\right| dt \ge \left|\int_{t_0}^{t_k} \dot{E}^* dt\right| = \left|\int_{t_0}^{t_k} M\dot{q}dt\right| = \left|E^*(t_k) - E^*(t_0)\right|. \tag{23}$$

Из (23) следует, что любое управление, для которого справедливо

$$J(t_0, t_k) = \int_{t_0}^{t_k} \left|M\dot{q}\right| dt = \left|\int_{t_0}^{t_k} \dot{E}^* dt\right| = \left|\int_{t_0}^{t_k} M\dot{q}dt\right| = \left|E^*(t_k) - E^*(t_0)\right|, \tag{24}$$

будет оптимальным в смысле минимизации функционала (21), т.е. с точки зрения минимизации затрат энергии на управление.

Примеры управления, оптимального в смысле минимизации энергетических затрат

Рассматривая задачу управления как задачу перевода изображающей точки из положения $(q_0, \dot{q}_0)$ в положение $(q_k, \dot{q}_k)$ на фазовой плоскости, можем утверждать, что оптимальным управлением в смысле минимизации функционала (21) будет, например, любая гладкая функция $M(t)$, знак которой в каждый момент времени совпадает со знаком скорости $\dot{q}(t)$, либо в каждый момент времени противоположен знаку скорости $\dot{q}(t)$. В частности, оптимальным в смысле минимизации функционала (21) будет управление

$$M(t) = k_{\dot{q}}\dot{q}(t),\ k_{\dot{q}} = const\,. \tag{25}$$

В случае импульсного управления скорость приведенной системы в некотором положении $q*$ изменяется скачком (за пренебрежимо малый промежуток времени $\left[t^-, t^+\right]$), на фазовой плоскости имеет место вертикальное перемещение изображающей точки.

$$\begin{aligned} &q(t^-) = q(t^+) = q*, \\ &\dot{q}(t^-) \neq \dot{q}(t^+). \end{aligned}\ . \tag{26}$$

В этом случае значение функционала (21) определяется разностью значений кинетической энергии системы в моменты времени t^- и t^+.

Если знак скорости не изменяется

$$\dot{q}(t^-)\dot{q}(t^+) \geq 0\,, \tag{27}$$

значение функционала (21) определяется выражением

$$J(t^-, t^+) = \left| \frac{1}{2}\frac{\gamma_1\gamma_2 - \gamma_3{}^2\cos^2 q*}{\gamma_1 + \gamma_2 + 2\gamma_3\cos q*}\dot{q}(t^+)^2 - \frac{1}{2}\frac{\gamma_1\gamma_2 - \gamma_3{}^2\cos^2 q*}{\gamma_1 + \gamma_2 + 2\gamma_3\cos q*}\dot{q}(t^-)^2 \right|. \tag{28}$$

Если знак скорости изменяется

$$\dot{q}(t^-)\dot{q}(t^+) < 0\,, \tag{29}$$

значение функционала (21) определяется выражением

$$J(t^-, t^+) = \left| \frac{1}{2}\frac{\gamma_1\gamma_2 - \gamma_3{}^2\cos^2 q*}{\gamma_1 + \gamma_2 + 2\gamma_3\cos q*}\dot{q}(t^+)^2 + \frac{1}{2}\frac{\gamma_1\gamma_2 - \gamma_3{}^2\cos^2 q*}{\gamma_1 + \gamma_2 + 2\gamma_3\cos q*}\dot{q}(t^-)^2 \right|. \tag{30}$$

Очевидно, что в случае (27) импульсное управление будет оптимальным в смысле минимизации функционала (21), а в случае (29) импульсное управление оптимальным в указанном смысле не будет.

При этом рассмотренное импульсное управление для случая (27) будет оптимальным также и при перемещении изображающей точки из положения $(q(t^-), \dot{q}(t^-))$ в положение $(q(t^+), \dot{q}(t^+))$ с последующим свободным баллистическим перемещением в любую точку фазовой траектории, содержащей точку $(q(t^+), \dot{q}(t^+))$.

В качестве примера на рис. 2 рассмотрен случай управления, состоящего из двух последовательных импульсов.

Уровень энергии, соответствующий фазовой траектории (линии уровня), содержащей точку 1, равен E_2^*. Уровень энергии, соответствующий фазовой траектории, содержащей точки 4 и 5, равен E_1^*. Уровень энергии, соответствующий фазовой траектории, содержащей точки 2 и 3, равен E_0^*.

Управление, переводящее изображающую точку из положения 1 в положение 3 при помощи первого импульса будет оптимальным, значение функционала (21) равно абсолютной величине разности значений полной энергии приведенной системы, соответствующих фазовым траекториям, содержащим начальную и конечную точки:

$$J_{13} = \left| E_2^* - E_0^* \right| = \left| \Delta E_{20}^* \right|. \tag{31}$$

При этом перемещение из точки 1 в точку 2 осуществляется за счет импульсного управления, а перемещение из точки 2 в точку 3 происходит по баллистической траектории.

Оптимальным будет также управление, переводящее изображающую точку из положения 2 в положение 5 при помощи второго импульса:

$$J_{25} = \left| E_0^* - E_1^* \right| = \left| \Delta E_{10}^* \right|. \tag{32}$$

Перемещение из точки 3 в точку 4 осуществляется за счет импульсного управления, перемещение из точки 4 в точку 5 происходит по баллистической траектории.

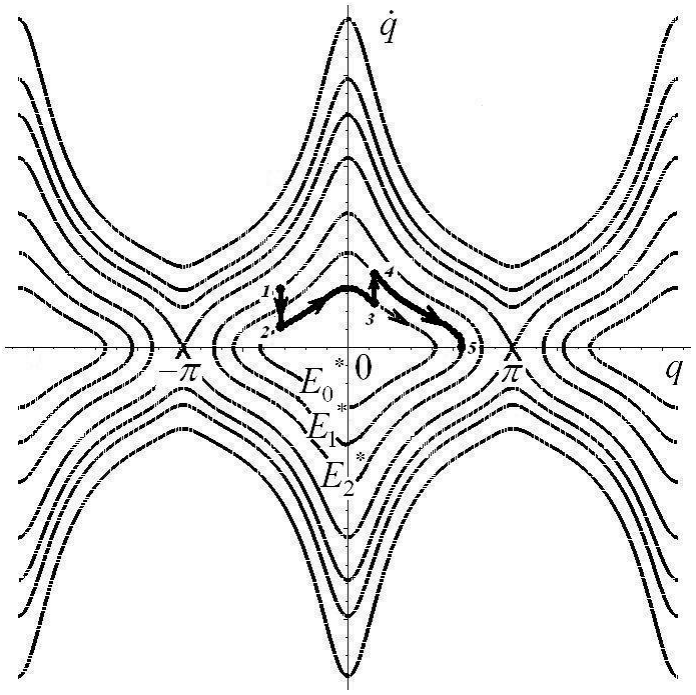


Рисунок 2 – пример управления,
переводящего изображающую точку из положения 1 в положение 5
с использованием собственного баллистического движения приведенной системы

Управление, переводящее точку из положения 1 в положение 5 при помощи двух импульсов оптимальным не будет, поскольку

$$J_{15} = \left| \Delta E_{10}^* \right| + \left| \Delta E_{20}^* \right| > \left| E_2^* - E_1^* \right|. \tag{33}$$

Таким образом, введение в рассмотрение приведенной системы и построение фазового портрета для собственных баллистических движений позволяет в ряде случаев оценивать качество управления в смысле минимизации функционала (21) по общему виду фазовой траектории управляемого движения.

Приведенные примеры показывают, что рассматриваемый критерий не накладывает жестких ограничений на управление $M(t)$, оптимальное в смысле минимизации функционала (21). Таким образом, может быть сформулирована задача поиска среди оптимальных в рассматриваемом смысле управлений некоторых, удовлетворяющих дополнительным критериям.

Заключение

В докладе рассмотрены критерии выбора программных движений роботизированного космического модуля, основанные на введении в рассмотрение приведенной нелинейной колебательной системы и анализе ее баллистических фазовых траекторий. Данный подход позволил выполнить наглядные оценки различных вариантов управления, оптимального в смысле минимизации функционала, характеризующего качество управления с точки зрения уменьшения затрат энергии. Сформулированы требования, позволяющие оценить соответствие критерию оптимальности по общему виду фазовой траектории.

Требования к управлениям, оптимальным в смысле минимизации рассматриваемого функционала, не накладывают жестких ограничений на класс используемых функций, что позволяет учитывать дополнительные соображения, определяемые техническим характером задачи, например, ограничения на относительное перемещение звеньев манипулятора, на значение управляющего момента, скорости, или требования по быстродействию.

1. Белоножко П.П. Перспективные монтажно-сервисные роботизированные космические модули // Робототехника и техническая кибернетика. 2015. – № 2(7). – С. 18 – 23.
2. Белоножко П.П. Космическая робототехника. Современное состояние, перспективные задачи, тенденции развития. Аналитический обзор. // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2016. № 12. С. 110 153. DOI: 10.7463/1216.0853919.
3. Белоножко П.П. Космическая робототехника. Опыт и перспективы развития // Воздушно-космическая сфера. 2018. № 1(94). С. 84 – 93.
4. Белоножко П.П. Исследование плоских инерционных движений космического манипулятора на подвижном основании как нелинейной колебательной системы // «Робототехника и техническая кибернетика», № 4(13) 2016. – С. 52 – 58.
5. Belonozhko P.P. Methodical Features of Acquisition of Independent Dynamic Equation of Relative Movement of One-Degree of Freedom Manipulator on Movable Foundation as Control Object // Smart Electromechanical Systems: The Central Nervous System. Studies in Systems, Decision and Control 95. Andrey E. Gorodetskiy, Vugar G. Kurbanov (ed.) – Springer International Publishing Switzerland, 2017 – P. 261 – 270. 10.1007/978-3-319-53327-8_19
6. Белоножко П.П. Анализ приведенной нелинейной колебательной системы, соответствующей одностепенным манипуляторам на подвижном и шарнирно закрепленном основании // «Робототехника и техническая кибернетика», № 3(16) 2017. – С. 44 – 52.
7. Юревич Е.И. Основы робототехники: учеб. пособие. – 3-е изд., перераб и доп. – СПб.: БХВ-Петербург, 2010. – 368 с.
8. Смольников Б.А. Проблемы механики и оптимизации роботов. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1991. – 232 с.
9. Формальский А.М. Управление движением неустойчивых объектов. – М: ФИЗМАТЛИТ, 2014. – 232 с. – ISBN 978-5-92221-1460-8.
10. Лурье А. И. Аналитическая механика / А. И. Лурье. — М. : Физматгиз, 1961. — 824 с.

V.M. Kopylov, I.Yu. Dalyaev

CONTROL AND SHEDULING METHODS FOR SERVICING SPACECRAFT EQUIPPED WITH MANIPULATORS

Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics, Saint-Petersburg
v.kopylov@rtc.ru

Abstract

This article presents features of on-orbit satellite servicing that depending on orbit they are considered, investigation the spacecrafts joining, stabilization and dynamic control, including manipulation system of service spacecraft.

Key words: satellite service spacecrafts, on-orbit servicing, spacecrafts dynamic control.

В.М. Копылов, И.Ю. Даляев

МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ И ПЛАНИРОВАНИЯ РАБОТЫ СЕРВИСНОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА, ОСНАЩЕННОГО МАНИПУЛЯТОРАМИ

ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург
v.kopylov@rtc.ru

Аннотация

В статье рассматриваются особенности обслуживания спутников сервисными космическими аппаратами (КА) в зависимости от орбиты, исследуются вопросы потенциальной стыковки, задачи стабилизации и управления движением, в том числе с учетом манипуляционной системы сервисного КА.

Ключевые слова: сервисные космические аппараты, орбитальное обслуживание, управление движением космического аппарата.

В настоящее время в ряде стран разрабатываются космические аппараты (КА) для сервисного обслуживания различных объектов на орбите Земли [1], [2], [3], ввиду перспективности таких КА с точки зрения эффективности использования космического пространства. При рассмотрении задачи построения облика таких КА возникает вопрос о средствах управления движением, а также планировании траектории полета с целью оптимального использования запасов топлива.

При постановке задачи создания сервисного КА, предназначенного для продления срока активного существования различных объектов на орбите, в первую очередь возникает вопрос выбора класса обслуживаемых объектов. Классификацию в данном случае удобно провести по типу орбиты обслуживаемого КА, так как он определяет в том числе возможность выполнения тех или иных задач КА.

В настоящее время эксплуатируются следующие основные виды КА с характерными орбитами:

– низкоорбитальные КА (высота полета до 1000км) дистанционного зондирования Земли (оптические, радио, в интересах разведки ресурсов, мониторинга, военных целей);

– навигационные КА, с орбитами высотой порядка 20000км (период 12 часов);

– КА связи и ретрансляции на вытянутых эллиптических орбитах типа «Молния» (перигей 500-800км, апогей за геостационарной орбитой);

– геостационарные КА различного назначения.

Распределение искусственных объектов в околоземном пространстве по высоте апогея [4] подтверждает правильность принятой классификации. Сервисный КА должен совершить облет нескольких целей обслуживания за весь свой срок службы – в противном случае пропадает смысл его создания. Рассмотрим особенности облета нескольких КА в каждом из выделенных классов.

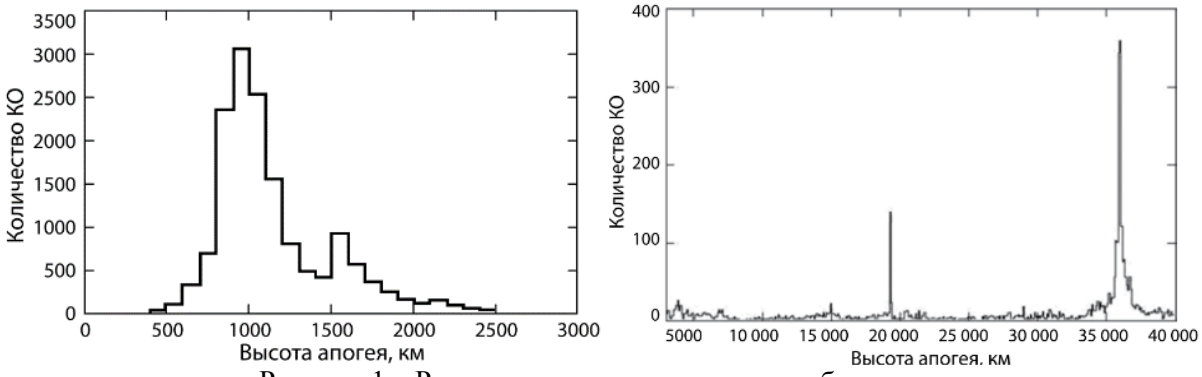


Рисунок 1 – Распределение искусственных объектов в околоземном пространстве по высоте апогея

Низкие орбиты

Высота полета низкоорбитальных КА ограничена нижней границей радиационного пояса Земли, и составляет обычно от 600 до 1500км. КА ДЗЗ обычно имеют наклонение порядка 40-60°, так как в данном случае полоса обзора охватывает всю поверхность Земли или ее большую часть. Для таких наклонений при высотах орбиты до 2000км скорость прецессии плоскости орбиты составляет от 0,1 до 0,5°/виток. Скорость прецессии плоскости орбиты (после подстановки известных постоянных, в градусах в сутки) определяется соотношением (1)[5].

$$\dot{\Omega} = -9{,}97\left(\frac{R_\oplus}{a}\right)^{3.5}\frac{\cos i}{\left(1-e^2\right)^2} \tag{1}$$

Исходя из требований непрерывности обзора земной поверхности, каждый тип КА ДЗЗ формирует спутниковую группировку – 3 и более спутников, плоскости орбит которых расположены, обычно, под равными углами друг к другу. Таким образом, для обслуживания спутников одной группировки сервисному КА может потребоваться изменение долготы восходящего узла на 120° или даже 180°. Эта задача может быть решена либо прямым маневром – что потребовало бы приращения скорости, сравнимого со значением орбитальной скорости самого КА, - либо путем перехода на орбиту с другой скоростью прецессии (орбита фазирования) и затем, через достаточное число витков, возвратом на орбиту обслуживаемого КА. Для изменения скорости прецессии орбиты можно варьировать эксцентриситет, большую полуось или наклонение орбиты. Изменения наклонения и эксцентриситета при равных влияниях на скорость прецессии орбиты требуют больших затрат скорости. В случае изменения большой полуоси затраты скорости и время ожидания на фазирующей орбите определяются из соотношений (2–4).

$$dV_\downarrow = \sqrt{\frac{\mu}{a_1}}\sqrt{2\frac{a_2}{a_1}-1}\left(1-\sqrt{2-\frac{a_1}{a_2}}\right) \tag{2}$$

$$dV_\uparrow = \sqrt{\frac{\mu}{a_1}}\left(\sqrt{\frac{a_1}{a_2}}-1\right) \tag{3}$$

$$T = \left|\frac{\Delta\Omega}{\dot{\Omega}_2-\dot{\Omega}_1}\right| = \frac{\Delta\Omega}{9{,}97\cos i}\frac{1}{\left(\frac{R_\oplus}{a_1}\right)^{3.5}-\left(\frac{R_\oplus}{a_2}\right)^{3.5}\frac{{a_2}^4}{{a_1}^2\left(2a_2-a_1\right)^2}} \tag{4}$$

Расчет по этой формуле приводит к необходимости обеспечить приращение скорости 200м/с при времени фазирования 1 год, или 120 м/с при времени фазирования 2 года (рассматривался перелет на 120 градусов). Таким образом, сервисный КА, предназначенный для поддержания работы семейства

низкоорбитальных КА, должен располагать запасом характеристической скорости порядка 1000м/с, что позволит ему обслужить не более 10 КА за весь срок существования. Ближайшим аналогом такого КА является разгонный блок.

Высокоэллиптические и средневысотные орбиты

Практически все спутники, находящиеся на высокоэллиптической орбите, имеют два возможных наклонения: 63°26' и 116°34'. Это связано с тем, что только при таких значениях наклонения отсутствует смещение перигея орбиты, вызванное влиянием второй гармоники геопотенциала. Скорость этого смещения (в градусах в сутки) описывается формулой (5).

$$\dot{\varpi} = 4{,}98\left(\frac{R_\oplus}{a}\right)^{3.5}\left(5\cos^2 i - 1\right) \tag{5}$$

Из-за большого эксцентриситета и малой высоты перигея, эти орбиты также подвержены прецессии со скоростью 0.4 – 1.7 угловых минут в сутки. Столь малая скорость прецессии в сочетании с большой высотой апогея делает практически невозможным перелет между различными орбитальными плоскостями. Тот же вывод можно сделать и в отношении орбит навигационных спутников. Сервисный КА для этих классов объектов может быть рассчитан только на обслуживание нескольких целей, находящихся в одной орбитальной плоскости (например, порядка 6-8 навигационных спутников).

Геостационарная орбита

В отличие от всех других классов КА, геостационарные спутники всегда находятся в одной плоскости – экваториальной, а параметры долготы восходящего узла и аргумента широты для ГСО теряют смысл. Единственным различием между спутниками на ГСО является аргумент широты КА, или же координата точки стояния. Международные требования к безопасности на ГСО [6] требуют особых правил маневрирования в районе этой орбиты. Величина безопасного коридора в окрестностях ГСО составляет 200км плюс добавка на гравитационные и светодинамические возмущения, которую для управляемого объекта можно не учитывать. Таким образом, перелет из одной позиции в другую требует четырех импульсов – подъем апогея, подъем перигея до высоты «ГСО+200км», и после фазирования – обратный двухимпульсный переход на ГСО в новую точку стояния. Для такого перехода потребуются следующие приращения скорости.

$$\begin{aligned}
&\Delta V_\downarrow = V_0\left[1 - \sqrt{\frac{2r_0 r_a}{r_p\left(r_a + r_p\right)}} - \left(r_p - r_0\right)\sqrt{\frac{2}{r_p\left(r_0 + r_p\right)}}\right]\\
&r_a = r_0 - \Delta h\\
&r_p = \sqrt[3]{2\mu\left(\frac{T - \Delta T}{\pi}\right)^2} - r_a\\
&\Delta V_\uparrow = V_0\left[\sqrt{\frac{2r_0 r_p}{r_a\left(r_a + r_p\right)}} + \left(r_a - r_0\right)\sqrt{\frac{2}{r_a\left(r_a + r_0\right)}} - 1\right]\\
&r_p = r_0 + \Delta h\\
&r_a = \sqrt[3]{2\mu\left(\frac{T + \Delta T}{\pi}\right)^2} - r_p\\
&\Delta T = \frac{T\alpha}{360°n - \alpha}\\
&V_0 = 3{,}0746\,км/с; r_0 = 42164\,км;\ T_0 = 86164\ с
\end{aligned} \tag{6}$$

Оценим массу топлива для сервисного КА, предназначенного для посещения нескольких КА-клиентов в течение своего срока службы. Предположим, для общности результата, что каждая операция обслуживания выполняется мгновенно. В таком случае, если за весь срок службы сервисный КА сможет выполнить N операций обслуживания, число витков фазирования должно быть равно:

$$n = \frac{R}{2N\left(T + \Delta T\right)}, \tag{7}$$

Из этого условия можно получить требуемое приращение периода при различных углах фазирования:

$$T + \Delta T = \frac{1 - \sqrt{1 - 4TA}}{2A};\ A = \frac{2N\alpha}{360° R} \tag{8}$$

Затраты топлива определяются пропорционально массе конструкции КА. Для сервисного КА со сроком существования 5 лет можно получить следующую оценку требуемых запасов топлива (рис.2).

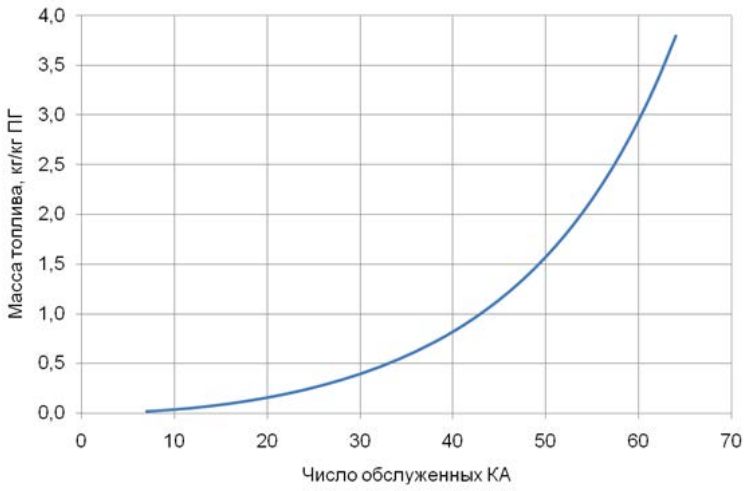


Рисунок 2 – Запасы топлива для сервисного КА на ГСО

Таким образом, обслуживание КА на ГСО является наиболее выгодным по сравнению с обслуживанием других классов КА.

Основные этапы сближения и стыковки

В процессе сближения сервисного КА с объектом обслуживания важно знать, на каком расстоянии до цели риск столкновения при возникновении нештатной ситуации минимален. Обозначим область вокруг КА-цели, в которой полностью исключен риск столкновения при возникновении определенных нештатных ситуаций, безопасной зоной. Исходя из общего построения сервисного КА, можно выделить три безопасных зоны:

– оперативная безопасная зона – время полета от 1.5 часов до суток, характерное время выполнения динамических операций на орбите;

– кратковременная безопасная зона – время полета порядка 1 месяца, характерное время полного анализа причин неисправности и возможного их устранения при эксплуатации КА;

– долговременная безопасная зона – время полета более 10 лет, соответствует расчетному сроку активного существования сервисного КА.

Размеры оперативной безопасной зоны характеризуются исключительно точностью траекторных измерений активного и пассивного КА, в настоящее время составляющие порядка 0.25км для навигационных КА [6]. Так как навигационные КА находятся на вдвое меньшей высоте, точность определения навигационных параметров для объекта на ГСО может быть ниже. Таким образом, в качестве ориентировочной границы оперативной безопасной зоны можно принять 250-500м от

объекта. На этом расстоянии сближение должно производиться по принципу самонаведения на объект, по оптическому или радиоканалу. При характерных размерах КА-цели, определяемых габаритами обтекателя РН (порядка 2.5-3м), можно получить требуемую точность поддержания ориентации сервисного КА: 15-20 угловых минут.

Требования к современным геостационарным спутникам ограничивают неопределенность точки стояния величиной 5-10 угл.мин. [7] (соответствует 60-120 км). При этом периодически осуществляется компенсация всех возмущений орбиты. Это расстояние можно принять в качестве кратковременной безопасной зоны - если сервисный КА не находится в одной орбитальной позиции с обслуживаемым КА-целью, в течение нескольких витков сближение невозможно даже при полном отказе навигационных систем обоих КА. Отклонения периода геостационарного КА в процессе управления составляют 1-2 секунды [8], соответственно в среднем длительность нахождения КА-цели в безопасной зоне составляет от 20 дней (для зоны 120км при низкой точности управления) до 40 дней (для зоны 60км при высокой точности управления).

Согласно рекомендациям МСЭ [5], в качестве долговременной безопасной зоны, гарантирующей отсутствие столкновений с активными КА на ГСО, может быть принята орбита ниже ГСО с зазором по высоте не менее 235км. Эта орбита исключает возможность столкновения с пассивными объектами на орбитах захоронения, находящихся выше ГСО, однако сама не может служить орбитой захоронения, так как в противном случае вышедший из строя сервисный КА будет создавать помеху при выведении новых КА на ГСО.

Особенности стыковки с некооперируемым объектом

Находясь на орбите, пассивный КА с полностью отключенной системой управления подвергается воздействию возмущающих моментов. Эти моменты имеют следующую природу:

- гравитационные (приливные);
- магнитные (на ГСО отсутствуют);
- аэродинамические (на ГСО отсутствуют);
- световое давление;
- гироскопические.

Гироскопические моменты (от действия переносного ускорения и торможения вращающихся масс) являются основными по своему вкладу во вращательное движение КА. Они зависят от угловой скорости вращения КА (обычно равной орбитальной) и кинетического момента вращающегося тела. В таблице 1 приведены основные причины возникновения гироскопических моментов.

Таблица 1. Причины возникновения гироскопических моментов

Прибор	Кинетический момент, Н·м·с	Гироскопический момент, Н·мм
Силовой гироскопический комплекс	30-100	2,2 - 7,3
Управляющий маховик	0,5-50	0,04 - 3,6
Датчик угловой скорости	0,1-1	0,01-0,07
Вентиляторы СОТР и жидкостный контур, датчики со сканирующей оптикой.	0,01 и менее	~0

Под действием приливных сил КА обычно занимает положение устойчивого равновесия (большая ось эллипсоида инерции вдоль радиус-вектора КА, малая ось – вдоль вектора угловой орбитальной скорости). Торможение вращающихся масс при выходе КА из строя может привести к «опрокидыванию» КА. Необходимый для этого кинетический момент можно определить из условия равенства энергии вращения маховика и потенциальной энергии КА в положении равновесия. Он равен

$$L = 3\frac{\mu}{\Omega_{\max} R^3}\Delta J\,, \qquad (9)$$

где dJ – разность центральных моментов инерции КА, μ – гравитационная постоянная Земли, Ω_{max} – угловая скорость вращения гироскопа, R – радиус-вектор орбиты. Для используемых в КА вращающихся масс, от вентилятора до гироскопа, критическое значение кинетического момента составляет 10^{-8}…10^{-6} Нмс в случае ГСО. Для сравнения, на низких околоземных орбитах эти величины составляют 0.01 – 0.2 Нмс, то есть служебные системы (вентиляторы и т.п.) не могут вывести КА из положения равновесия. В то же время, геостационарный КА, вышедший из строя, скорей всего покинет положение устойчивого равновесия. Первоначальное вращение будет постепенно усиливаться за счет действия светового давления. Для захвата или стыковки с крупным вращающимся объектом необходимо, во-первых, знать безопасный интервал причаливания. Он характеризуется, в первую очередь, отсутствием риска столкновения с протяженными элементами КА-цели, такими как солнечные батареи или антенны ретрансляции. Во-вторых, необходимо знание угловой скорости вращения объекта, для выбора места захвата из условия минимальной взаимной скорости точки захвата на поверхности цели и конечного звена манипулятора. Так как у большинства КА, из-за наличия протяженных элементов, оси эллипсоида инерции не совпадают с осями симметрии (иногда на несколько градусов), а центральные моменты инерции по своей величине сильно разнятся, движение вышедшего из строя КА будет нерегулярным. В общем случае желательно иметь способ определения как текущей угловой скорости, так и моментов инерции КА, с целью задания исходных данных для решения уравнений вращательного движения. Восстановление вектора угловой скорости и картины движения по одной известной проекции угловой скорости и известным моментам инерции рассмотрено в работах [9,10]. При условии знания угловой скорости вращения тела, возможно определение центральных моментов инерции [11]. К сожалению, сторонний наблюдатель в принципе не может определить одновременно все компоненты угловой скорости и главные моменты инерции тела, а методы, рассмотренные в [9-11] дают лишь асимптотические оценки, являющиеся решением системы-наблюдателя. Поэтому процесс идентификации параметров движения КА-цели может занять длительное время, и обычно требует каких-либо сторонних источников данных (результаты контрольных взвешиваний КА, экспертные оценки распределения масс и т.п.).

В результате рассмотрения особенностей стыковки и захвата объекта можно предложить следующую тактику захвата произвольного объекта на орбите (включая объекты космического мусора):

1. Сближение до оперативной безопасной зоны;
2. Видеосъемка КА-цели;
3. Оценка состояния КА-цели наземными службами;
4. Определение проектного тензора инерции;
5. Расчет угловой скорости, прогноз «на время»;
6. Корректировка расчета до сходимости тензора инерции;
7. Определение безопасной траектории подхода;
8. Определение по прогнозу угловой скорости места стыковки и момента времени, в который скорость этого места относительно захвата РТС будет минимальна;
9. Стыковка по плану, или отмена операции при невозможности соблюсти п.8.

Управление движением КА с РТС

Все время функционирования сервисного КА можно разбить на несколько типовых участков полета:

- отделение от РБ/РН и начальные операции;
- маневр перелета на орбиту фазирования или на ГСО;
- маневр смены наклонения;
- наведение на цель;
- начальное сближение и удержание цели;
- конечное сближение и захват (работа РТС);
- связанное движение двух тел (работа РТС);
- полет на "парковочной" орбите с обслуживанием от ЦУП.

Так как величины возмущающих воздействий при работе РТС, выдаче импульса и наведении на цель существенно (на порядок и более) различаются, сервисный КА должен обладать несколькими видами исполнительных органов системы ориентации.

В процессе стыковки поступательное и вращательное движение КА тесно связаны. Из-за большой величины возмущающих моментов управление движением КА вокруг центра масс возможно только с помощью реактивных средств. Основной закон управления с помощью реактивных двигателей - управление по длительности включения.

$$u_i = -k_{1i}\left(\Delta\varphi_i + k_{2i}\Delta\omega_i\right)$$
$$\tau_i = \begin{cases} dT \cdot \operatorname{sgn} u_i, & |u_i| > dT \\ 0, & |u_i| < \tau_{\min} \\ u_i, & otherwise \end{cases}, i = x, y, z \qquad (10)$$

где dT – такт управления (определяется частотой опроса приборов системы управления движением), τmin – минимальное конструктивное время включения двигателя, Δφ – отклонение по углу, Δω – отклонение по угловой скорости. Коэффициент управления k_1 определяет точность наведения (чем выше, тем точнее), коэффициент управления k_2 – уровень фильтрации шумов (гладкость управления, чем выше, тем больше фильтрация). Выбор коэффициента k_2 определяется как требованиями по фильтрации шумов, так и жесткостью конструкции - при чрезмерном завышении этого коэффициента система управления может войти в автоколебательный режим, поддерживая резонансную частоту колебаний конструкции КА. Обычный диапазон k_2 для КА с солнечными батареями мощностью 1-2 кВт составляет 4-5 ед. Коэффициент k_1 можно определить исходя из требуемой точности наведения по формуле:

$$k_{1i} = \frac{\Delta\varphi_{треб} + k_2 \frac{M_i}{J_i} dT}{\tau_{\min}}, \; i = x, y, z, \qquad (11)$$

где Mi – момент, развиваемый двигателями в канале управления, Ji – компонент тензора инерции КА, соответствующий каналу управления.

На расстоянии порядка 10м и менее до объекта-цели включения двигателей сервисного КА могут повлиять на движение цели. Это влияние может заключаться не только в отталкивании цели струей газов, но и в закрутке цели, которая, в свою очередь, может сделать стыковку невыполнимой. По этой причине сближение в 10-метровой зоне и захват необходимо производить с отключенными исполнительными органами управления движением. Задачей системы управления на этом участке является учет всех возможных возмущающих моментов и прогноз положения КА в пространстве. Так как масса КА значительно превышает массу РТС, в свободном полете возможна переориентация РТС и захват цели, при наличии некоторого запаса скорости и требуемой начальной ориентации сервисного КА. Существуют три концепции управления при захвате:

1) Компенсацию газодинамических возмущений берет на себя пассивный КА (при условии, что его система управления способна на это). Система управления сервисного КА получает априорную информацию о реализуемых кинетических моментах РТС и создает упреждающее управление для компенсации этих возмущений (дополнительно к управлению u). В этом случае формула (10) записывается следующим образом:

$$u_i = -k_{1i}\left(\Delta\varphi_i + k_{2i}\Delta\omega_i\right) - \frac{\int_{dT} M_{PTC\,i}\, dt}{M_i}$$
$$\tau_i = \begin{cases} dT \cdot \operatorname{sgn} u_i, & |u_i| > dT \\ 0, & |u_i| < \tau_{\min} \\ u_i, & otherwise \end{cases}, i = x, y, z \qquad (12)$$

2) Движение пассивного КА неуправляемо, при этом активный КА осуществляет прогноз своего положения в результате движения РТС. В данном случае прогноз осуществляется путем решения системы уравнений [12].

$$\begin{aligned}
&\frac{d(\mathbf{J}\times\boldsymbol{\omega})}{dt}+\sum_i C_i\cdot\ddot{\varphi}_i=M_\Sigma\\
&m\cdot\dot{u}+\sum_i D_i\cdot\ddot{\varphi}_i=F_\Sigma,\qquad i=1...N\\
&\lambda'=\frac{1}{2}\cdot\lambda\circ\boldsymbol{\omega}\quad-\left\langle\frac{1}{2}\cdot\lambda\cdot[|\lambda|^2-1]\right\rangle\\
&\mathbf{r}'=\mathbf{u}
\end{aligned}\tag{13}$$

где матрицы C и коэффициенты D определяют инерционные свойства каждого из звеньев РТС (матрицы C соответствуют тензору инерции, коэффициенты D - массе звена), λ – кватернион углового положения КА в инерциальной системе координат, J - тензор инерции КА, m – масса КА, u – линейная скорость КА, ω – угловая скорость КА, φ – угол поворота звена РТС. Тензор инерции каждого звена рассматривается относительно центра масс КА. Ориентацию звеньев можно определить по итерационной процедуре:

$$\begin{aligned}
&\mathbf{T}_i=\mu_i^{i-1}\circ\ldots\circ\mu_0^1\circ\mathbf{Tn}_i\circ\tilde{\mu}_i^{i-1}\circ\ldots\circ\tilde{\mu}_0^1\\
&\mu_i^{i-1}=\cos\frac{\varphi_i}{2}+\mathbf{T}_i\sin\frac{\varphi_i}{2}\\
&\mu_i^0=\mu_i^{i-1}\circ\ldots\circ\mu_i^{i-1}
\end{aligned}\tag{14}$$

где Tn – вектор оси поворота звена РТС в системе координат этого звена, μAB - кватернион положения звена A относительно звена B, и в качестве нулевого звена принят корпус КА. Так как рабочая область манипулятора РТС КА обычно имеет радиус 1-2 метра, возмущения вращательного движения будут превосходить по относительной величине возмущения поступательного движения. Так как сервисный КА при выдвижении манипуляторов в сторону КА-цели будет удаляться от цели (в результате реакции), целесообразно вводить его в зону захвата с небольшим запасом по скорости (порядка 0,1 м/с).

3) При наличии на активном КА как минимум двух манипуляторов возможно такое планирование их траектории, при котором суммарные возмущения будут стремиться к нулю. В таком случае компенсацию этих возмущений можно возложить на гироскопические исполнительные органы (маховики или силовой гироскопический комплекс). Алгоритм движения манипуляторов КА для такого случая управления приведен в [13]. Благодаря скоротечности процесса захвата суммарные отклонения сервисного КА от заданного положения в результате работы РТС не превышают 1,5 угловых минут, хотя угловая скорость возмущений составляет до 0,0035°/с – достаточно большая для КА величина.

После захвата и гашения возмущений, полученных при ударе, коэффициенты управления движением по углу и угловой скорости должны быть определены заново, с учетом изменившихся инерционных и жесткостных характеристик сцепки двух КА. Оценить жесткость сцепки можно по показаниям силомоментных датчиков, встроенных в манипуляторы РТС, при условии возможности измерения ими виброускорений с частотами до 200Гц.

Управление движением КА на этапе вне стыковочных операций целесообразно осуществлять гироскопическими органами (маховики или силовые гироскопы), при условии сброса кинетического момента этих органов управления с помощью реактивных систем. Ввиду малой величины неконсервативных возмущений (порядка 0.1…0.5Н*мм), вмешательство реактивных органов управления будет минимальным.

При сближении внутри оперативной безопасной зоны требуется одновременное выполнение условий равенства нулю дистанции до КА-цели и взаимной скорости КА. В соответствии с этими

требованиями, движение центра масс сервисного КА имеет смысл рассматривать на фазовой плоскости с координатами «дистанция» – «взаимная скорость». При идеальном подходе потребуется однократная смена знака ускорения в процессе стыковки, а траектория будет представлять собой две параболы

$$S(V)=\begin{cases} S_0-\dfrac{V^2}{2a_{nom}}, S>0.5S_0 \\ \dfrac{V^2}{2a_{nom}} \end{cases} \tag{15}$$

Для управления удобнее линеаризовать эту траекторию, и задать некоторый диапазон изменения параметров. В результате получим четыре прямых, ограничивающих зону траектории стыковки на фазовой плоскости. Центральные прямые (с нулевой погрешностью)

$$V(S)=\begin{cases} 2(S-S_0)\sqrt{\dfrac{a_{nom}}{S_0}}, S>0.5S_0 \\ -2S\sqrt{\dfrac{a_{nom}}{S_0}} \end{cases} \tag{16}$$

Таким образом, управление движением при стыковке описывается следующим законом:

$$V_-=\begin{cases} 2(S-S_0-dS)\sqrt{\dfrac{a_{nom}}{S_0}}, S>0.5S_0 \\ -2(S+dS)\sqrt{\dfrac{a_{nom}}{S_0}} \end{cases}$$

$$V_+=\begin{cases} 2(S-S_0+dS)\sqrt{\dfrac{a_{nom}}{S_0}}, S>0.5S_0 \\ -2(S-dS)\sqrt{\dfrac{a_{nom}}{S_0}} \end{cases} \tag{17}$$

$$u=\begin{cases} -\operatorname{sgn}(S-0.5S_0)a_{nom}, V\le V_- \\ 0, V_-<V<V_+ \\ \operatorname{sgn}(S-0.5S_0)a_{nom}, V\ge V_+ \end{cases}$$

Возмущения, вызванные работой двигателей ориентации, при данном подходе могут считаться «внешними», и учитываться выбранным управлением u. Пример фазовой траектории стыковки и соответствующего графика дальности приведен на рисунке 3, соответствующий ему график изменения дальности – на рисунке 4.

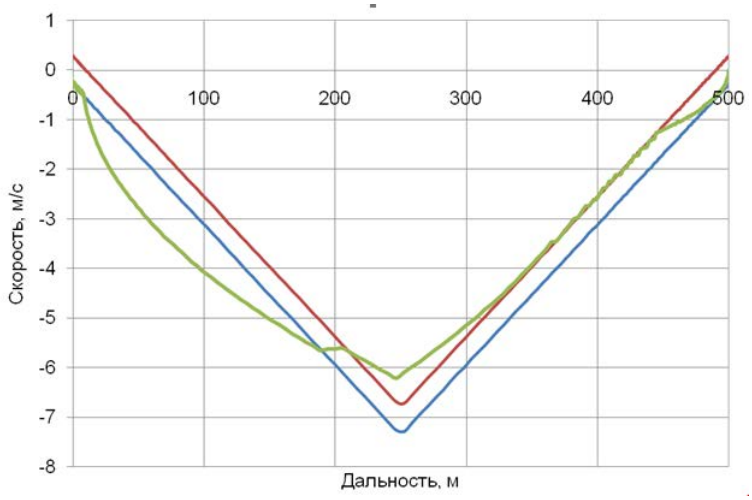


Рисунок 3 – Фазовый портрет стыковки

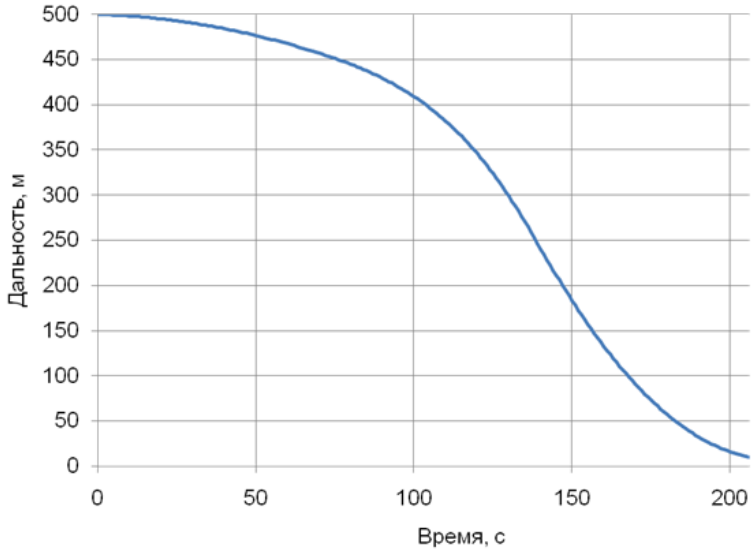


Рисунок 4 – Расстояние между КА в процессе стыковки

Управление движением в плоскости, перпендикулярной направлению на цель, сводится к поддержанию центрального положения цели относительно сервисного КА. Алгоритм управления аналогичен угловой стабилизации.

1. T. Kasai, M.Oda, T.Suzuki. "Results of the ETS-7 mission - rendezvous docking and space experiments". // Proceedings of 5th International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space (i AIRAS), Noordwijk, Netherlands, 1999..
2. C.G. Henshaw "The DARPA Phoenix spacecraft servicing program: Overview and plans for risk reduction", International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space, 2014.
3. D. Reintsema, J. Thaeter, A. Rathke, W. Naumann, P. Rank, J. Sommer "DEOS – The german robotics approach to secure and de-orbit malfunctioned satellites from Low Earth Orbits". http://robotics.estec.esa.int/i-SAIRAS/isairas2010/PAPERS/047-2827-p.pdf
4. С.С. Вениаминов. Космический мусор - угроза человечеству, М., ИКИ РАН, 2013, 207стр.
5. Рекомендация МСЭ-R S.1003-2 12/2010
6. Л.Н. Лысенко, В.В. Бетанов. "Принципы и основные направления совершенствования наземного автоматизированного комплекса управления космическими полетами". Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. “Машиностроение”. 2011. №1
7. Н.Н. Севастьянов. "Концепция построения системы ориентации и управления движением спутника связи "Ямал". Штатная схема функционирования". Вестник Томского государственного университета, №2(22), 2013

8. В.В.Салмин, А.С.Четвериков. "Управление плоскими параметрами орбиты геостационарного космического аппарата с помощью двигателя малой тяги". Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. Т.14, №4, 2015г.
9. В.Ф. Щербак "Определение вектора угловой скорости по его проекции", Механика твердого тела, №39, 2009г.
10. В.Ф. Щербак "Редуцированный наблюдатель механических систем", Механика твердого тела, №41, 2011г.
11. В.Ф. Щербак "Идентификация моментов инерции твердого тела", Механика твердого тела, №43, 2013г.
12. М.Г. Игнатьев, В.М. Копылов, А.Ю. Кулаков, М.В. Сотников. "Программный комплекс моделирования стабилизированного движения космического аппарата с трансформируемыми упругими элементами конструкции". Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева, №3/2013
13. S.V. Shah, I. Sharf, A.K. Misra "Reactionless path planning strategies for capture of tumbling objects in space using a dual-arm robotic system". Режим доступа: http://robotics.iiit.ac.in/uploads/Main/Publications/Shah_etal_AIAAGNCC_13.pdf.

F.B. Tebueva, V.I. Petrenko, V.O. Antonov, M.M. Gurchinsky, N.Yu. Svistunov

A METHOD OF DETERMINING THE MUTUAL POSITION OF OPERATOR'S ARM JOINTS FOR ANTHROPOMORPHIC SPACE MANIPULATOR CONTROL

North-Caucasus Federal University, Stavropol
ant.vl.02@gmail.com

Abstract

In this paper a method of calculation of Cartesian coordinates of operator's arm joints for anthropomorphic manipulator control using upper-limb exoskeleton is presented. The kinematic scheme of the exoskeleton is similar to that of the human hand. It has rigid coupling with the operator in the shoulder joint, the wrist joint, and the hand. The input data for the calculations is the generalized coordinates of the exoskeleton.

Coordinates of the shoulder joint, wrist joint and the hand are calculated by solving the direct kinematics. To calculate the spatial coordinates of the elbow joint of the operator's hand, an analytical method for solving the inverse kinematics is proposed.

The proposed method has low computational complexity and provides a fairly accurate calculation of the coordinates of operator's arm joints. As a result of applying the method, the coherence between the operator movement and the manipulator movement can be increased. It allows the operator to perform tasks faster, and also helps to avoid obstacles.

Key words: anthropomorphic manipulator, exoskeleton, space manipulator, forward kinematics problem, inverse kinematics problem, nodal points coordinates, spatial coordinates determination.

Ф.Б. Тебуева, В.И. Петренко, В.О. Антонов, М.М. Гурчинский, Н.Ю. Свистунов

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЗАИМОПОЛОЖЕНИЯ СУСТАВОВ РУКИ ОПЕРАТОРА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ АНТРОПОМОРФНЫМ КОСМИЧЕСКИМ МАНИПУЛЯТОРОМ

ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет», Ставрополь
ant.vl.02@gmail.com

Аннотация

В статье представлена методика расчета декартовых координат суставов руки оператора для управления антропоморфным манипулятором с помощью экзоскелета верхней конечности. Кинематическая схема экзоскелета подобна схеме руки человека и имеет жесткую сцепку с

оператором в плечевом и лучезапястном суставах, а также кисти. Входными данными для расчетов являются обобщенные координаты экзоскелета.

Координаты плечевого и лучезапястного суставов, а также кисти оператора рассчитываются посредством решения прямой задачи кинематики. Для расчета пространственных координат локтевого сустава руки оператора предложен аналитический способ решения обратной задачи кинематики.

Предлагаемая методика обеспечивает низкозатратный с точки зрения вычислительной сложности и достаточно точный расчет координат суставов руки оператора для организации копирующего управления антропоморфным космическим манипулятором с помощью экзоскелета. В результате применения разработанной методики может быть повышена синхронность движений оператора и манипулятора, что приводит к уменьшению времени, затрачиваемого оператором на выполнение целевых задач, а также снижает вероятность столкновения манипулятора с препятствиями.

Ключевые слова: антропоморфный манипулятор, экзоскелет, космический манипулятор, прямая задача кинематики, обратная задача кинематики, координаты узловых точек, определение пространственных координат.

Введение

Для обеспечения высокой точности выполнения операций с помощью манипулятора в условиях космоса, а также во избежание повреждения оборудования вследствие столкновения манипулятора с препятствиями, необходимо осуществлять точное позиционирование рабочего окончания и надежный контроль расположения узловых точек манипулятора.

Одним из способов управления, удовлетворяющих данным условиям, является копирующее управление, осуществляемое посредством захвата движения руки оператора задающим устройством, выполненным в виде экзоскелета, с последующей передачей команд антропоморфному манипулятору. Такая система управления относится к биотехническим системам, через которые оператор может управлять роботом или программировать его действия [1]. Достоинствами подобных устройств являются простота и удобство использования, а недостатками – ограниченность движения оператора и сложность разработки подобных систем.

Космический антропоморфный манипулятор может являться самостоятельным инструментом, либо входить в состав другого манипулятора, например, в качестве рабочего окончания (рисунок 1). В таком случае первоначальное позиционирование подобного составного манипулятора может быть произведено с помощью менее точных, но более простых в реализации способов управления, а непосредственное выполнение целевых операций – способом копирующего управления. Для повышения удобства видеоконтроля возможно использование подвижной видеокамеры, расположенной относительно антропоморфного манипулятора подобно тому, как голова человека расположена относительно руки.

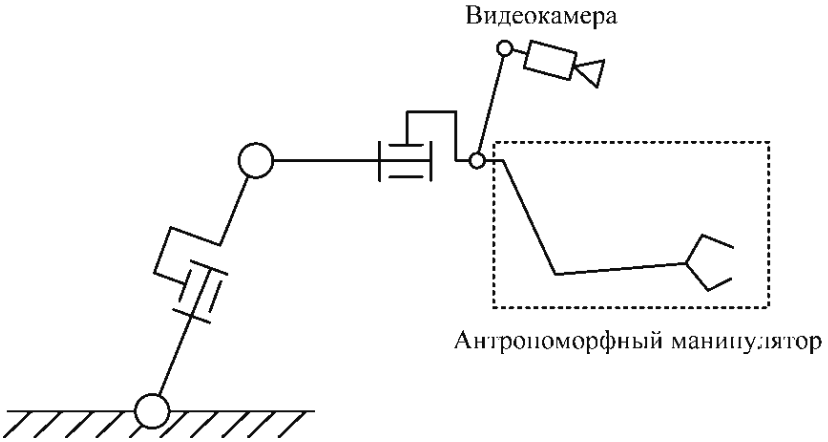


Рисунок 1 – Вариант установки антропоморфного манипулятора в качестве рабочего окончания

Одной из разновидностей задающих устройств при копирующем типе управления являются экзоскелеты, имеющие кинематическую схему, аналогичную схеме конечности оператора [1]. Расчет координат суставов руки оператора при управлении антропоморфным манипулятором через задающее устройство является неотъемлемой частью копирующего управления. Взаимодействие в таком случае

происходит по цепочке «оператор – задающее устройство (устройство копирующего типа) – исполнительное устройство (антропоморфный манипулятор)».

Экзоскелеты для захвата движения оператора от различных производителей являются уникальными. В качестве целевого устройства в данной работе рассматривается ЗУКТ-3, производимое АО «НПО «Андроидная техника». Данное устройство имеет 7 степеней подвижности. Для сочленения экзоскелета и руки оператора применяются жёсткие сцепки в плече и кисти. Для удобства эксплуатации в нем также присутствуют гибкие сцепки в районе локтя. Данный факт позволит рассчитать положение локтевого сустава с достаточно высокой точностью.

В текущей версии данного устройства осуществляется регистрация обобщенных координат экзоскелета и передача полученных значений в исполнительное устройство (манипулятор), без определения положения суставов руки оператора. Несмотря на некоторую синхронность движений оператора и манипулятора, при работе необходимо учитывать тот факт, что копируется движение не непосредственно оператора, а надетого на него экзоскелета. Вносимая таким подходом рассинхронизация увеличивает время выполнения оператором целевых операций из-за сложностей с точным позиционированием узловых точек манипулятора. Таким образом, является актуальной задача разработки методики точного определения положения суставов руки оператора для устройств подобного типа. Целью данной работы является разработка методики расчета координат суставов руки оператора при работе с задающими устройствами, аналогичными ЗУКТ-3, с максимально возможной точностью.

Обзор литературы

Актуальной проблемой при разработке решений для копирующего управления роботом является обеспечение заданной степени точности при исполнении целевых операций. Отечественные и зарубежные авторы активно занимаются исследованием указанной проблемы. К примеру, в работах [2-5] предлагаются различные решения для аппаратной составляющей управления экзоскелетом: в [2] – общий аналитический метод разработки экзоскелетов, не подверженных эффекту рассогласования движений с оператором, в [3] – двухуровневая структура аппаратной составляющей системы управления экзоскелетом с избыточной степенью подвижности, в [4] – легковесный экзоскелет для верхних конечностей с пятью степенями подвижности, конструкция которого позволяет вращать запястье, локоть и плечо, в [5] – рассматривается система копирования движений и проведен анализ производительности системы копирования движения на основе информации о скорости движений робота с двумя степенями подвижности. Проблема точности позиционирования исполнительного устройства при копирующем управлении роботом исследуется в работах [6, 7].

Определение пространственного положения суставов руки оператора или узловых точек манипулятора рассмотрено в работах [8-11]: в [8] предложен алгоритм предотвращения рассогласования при управлении антропоморфным роботом, в [9] – алгоритм предотвращения столкновений между парами звеньев робота с избыточной степенью подвижности путем предварительно заданного коэффициента минимального расстояния, в [10] – метод определения пространственного положения мобильного робота на основе визуального одометра, в [11] – кинематическая модель робота Fanuc AM100iB.

Обзор технологий космической робототехники для обслуживания различных объектов на орбите представлен в работе [12]. Роботизированное обслуживание целевого спутника, который в общем случае не соответствует стандартам сервисного робота, является открытой исследовательской областью, с которой связаны многие технические проблемы. Одной из самых больших проблем является обеспечение безопасного и надежного обслуживания целевого космического корабля с помощью сервисного, или захват цели для её стабилизации и последующего обслуживания. Проблема планирования движения и управления космическим роботом для захвата спутника с целью дальнейшей стыковки рассматривается в работе [13]. Представлен способ управления космическим роботом на стадии стыковки после захвата цели на основе кривых Безье и адаптивного метода роя частиц. Ввиду отсутствия гибкости существующих методов телеметрического управления в работе [14] предложен метод адаптивного терминального скользящего режима подобия для управления космическим роботом. Результаты экспериментальных исследований показали, что точность управления роботом составляет около 97,58%.

Альтернативы выбранного способа копирования движения, также решающие проблемы определения пространственных координат суставов руки оператора, приведены в следующих работах:

в [15] предложена методика управления манипулятором с помощью датчика Kinect, в [16] предложены телеоперации робота для отслеживания положения оператора с помощью устройства захвата движения Kinect и использования алгоритмов решения обратной задачи кинематики. Методы продемонстрированы на манипуляторе Mitsubishi Movemaster EX с пятью степенями свободы. Анализ и разработка алгоритма управления манипулятором с 7-ю степенями подвижности представлены в работе [17], а в [18] предложена вязкоупругая модель для разрешения избыточности антропоморфных манипуляторов с 7-ю степенями подвижности. Анализу кинематического и динамического аспекта человеческой руки для решения проблемы избыточности антропоморфных манипуляторов с 7-ю степенями подвижности посвящены работы [19, 20].

В работе [21] представлен программно-аппаратный комплекс, предназначенный для выполнения основных технологических операций на Международной космической станции. Состав комплекса включает устройство копирующего типа ЗУКТ-3 и антропоморфный робот SAR-401 второго поколения, а также систему управления. Тестирование разработанного комплекса было проведено в научно-испытательном центре подготовки космонавтов в 2013 и 2015 годах, результаты которого показали возможность использования управления копирующего типа для выполнения типичных космических операций.

Анализ существующей литературы по применению копирующего управления робототехническими системами показал актуальность темы исследования и возможности ее применения в различных областях техники. Анализ существующих подходов к определению пространственного положения суставов оператора или узловых точек манипулятора в пространстве отражает индивидуальность использования разработанных методов под конкретное задающее устройство. Выбранным аналогом для предлагаемой методики является существующая методика регистрации углов поворота задающего устройства, реализованная для управления антропоморфным манипулятором роботов модели AR-600 (601) через задающее устройство копирующего типа ЗУКТ-3 от НПО «Андроидная техника» [22, 23]. Методика заключается в регистрации углов поворота во вращательных парах экзоскелета и их передаче на исполнительное устройство без какой-либо обработки. При рассмотрении выбранного аналога ЗУКТ-3 обнаружена проблема в точности выполнения целевых операций. Следовательно, актуальной задачей является разработка методики определения пространственного положения суставов руки оператора при управлении через задающее устройство копирующего типа.

Постановка задачи

Рассмотрим задающее устройство копирующего типа (например, ЗУКТ-3), называемое экзосклетом. Экзоскелет имеет аналогичные суставам оператора сочленения: плечевое, локтевое, лучезапястное, кистевое. Обозначим сочленения ЗУКТ-3 переменными: A – плечевое, B – локтевое, C – лучезапястное, D – кистевое. Аналогичные суставы оператора обозначим через A_O, B_O, C_O, D_O. На рисунке 2 приведена замкнутая кинематическая цепь, образуемая ЗУКТ-3 и рукой оператора. На схеме отрезки AB, BC, CD представляют собой плечевое, локтевое и кистевое звенья задающего устройства, отрезки A_OB_O, B_OC_O, C_OD_O – аналогичные звенья руки оператора. Как видно из рисунка 2, рука оператора и задающее устройство зафиксированы двумя жесткими сцепками – A_OOA, C_oD_ODC и одной гибкой сцепкой – E_OE. Сцепка A_OOA предназначена для предотвращения взаимного движения плечевого сустава оператора A_O и плечевого сочленения экзоскелета A, являющихся точками отсчёта координат конечности оператора и экзоскелета. Сцепка C_OD_ODC объединяет кистевые звенья оператора и экзоскелета для большего контроля над движением экзоскелета. Гибкая сцепка E_OE предназначена для соблюдения необходимых ограничений в движении локтевого сочленения по аналогии с ограничениями движения локтевого сустава руки человека.

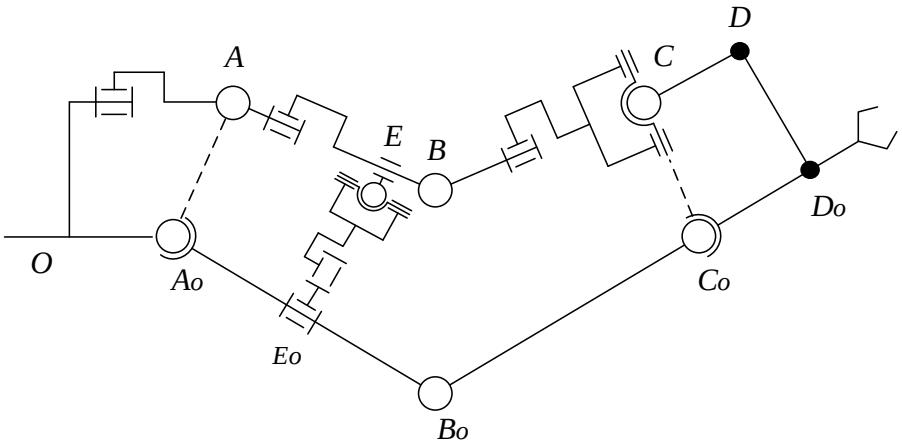


Рисунок 2 – Замкнутая кинематическая цепь, образуемая ЗУКТ-3 и рукой оператора

Положение экзоскелета характеризуется обобщенными координатами, представляющими углы поворота во вращательных кинематических парах. Связанные с каждым звеном системы координат в положении с нулевыми значениями обобщенных координат представлены на рисунке 3. Ось z каждого звена сонаправлена с предыдущим звеном (для точки A ось A_z сонаправлена с глобальной осью z).

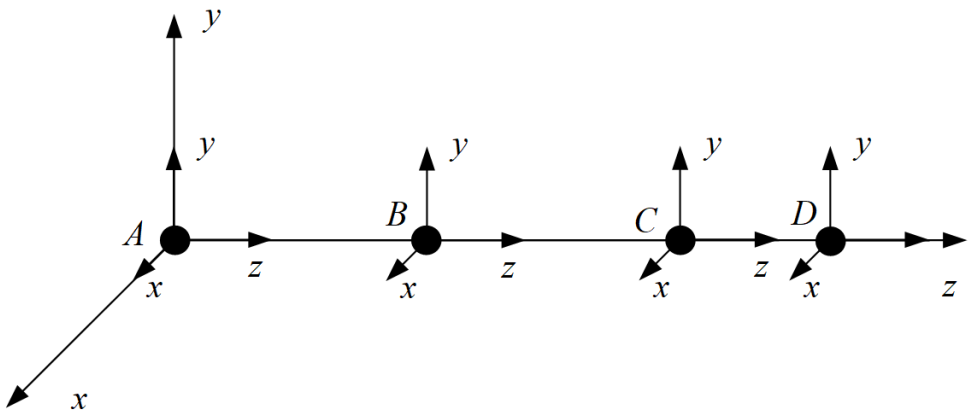


Рисунок 3 – Связанные системы координат

Для ориентации в пространстве плечевого звена AB предназначены две первые вращательные кинематические пары на рисунке 3, если вести отсчёт от точки O. Соответствующие углы поворота обозначим как α_A, β_A. Следующие две вращательные пары предназначены для ориентации локтевого звена BC экзоскелета. Соответствующие углы поворота обозначим как α_B, β_B. Оставшиеся три вращательных пары предназначены для ориентации кистевого звена CD. Соответствующие углы поворота обозначим как $\alpha_C, \beta_C, \gamma_C$. Примем, что осью вращения для отсчитываемых углов α является ось z, отсчет ведется от оси x. Для углов β осью вращения является ось x, отсчет ведется от оси z. Для угла γ осью вращения является ось y, отсчет ведется от оси x.

Таким образом, исходными данными являются:

1) координаты точки $A_O = (0; 0; 0)$, принятой за начало отсчёта;
2) вектор жесткой сцепки $\overrightarrow{A_oA} = (x_{A_OA}; y_{A_OA}; z_{A_OA})$;
3) обобщенные координаты положения экзоскелета $\{\alpha_A, \beta_A, \alpha_B, \beta_B, \alpha_C, \beta_C, \gamma_C\}$;
4) длины звеньев руки оператора $l_{A_oB_o}$, $l_{B_oC_o}$, $l_{C_oD_o}$ и длины звеньев экзоскелета l_{AB}, l_{BC}, l_{CD};
5) длина сцепки C_OC.

Необходимо найти координаты узловых точек руки оператора A_O, B_O, C_O, D_O.

Схема предлагаемой методики

Общая схема предлагаемой методики состоит из трёх этапов:

Этап 1. Расчет координат точек сочленений A, B, C, D задающего устройства.

Этап 2. Расчет координат точек суставов руки оператора C_O, D_O, находящихся в жесткой сцепке с экзоскелетом.

Этап 3. Расчет координат точки локтевого сустава B_0 руки оператора.

Для расчетов на первом и втором этапах применяется метод решения прямой задачи кинематики с использованием направляющих углов для звеньев копирующего устройства и жестких сцепок. На третьем этапе расчет координат локтевого сустава руки оператора B_O выполняется с помощью аналитического решения обратной задачи кинематики.

На этапе 1 предлагается осуществлять расчет пространственных координат плечевого, лучезапястного, локтевого и кистевого сочленений задающего устройства A, B, C, D. Началом координат будем считать координаты точки $A_O = (0; 0; 0)$ плечевого сустава оператора.

Координаты плечевого сочленения A задающего устройства можно рассчитать по формулам:

$$\overrightarrow{A_O A} = \{l_{AA_O} \cdot \cos(\alpha_{A_O A}), l_{AA_O} \cdot \cos(\beta_{A_O A}), l_{AA_O} \cdot \cos(\gamma_{A_O A})\} = \{x_{A_O A}, y_{A_O A}, z_{A_O A}\}, \quad (1)$$

$$A = T_{A_O A} \cdot A_O, \quad (2)$$

где

l_{AA_O} – длина сцепки AA_O; $\alpha_{A_O A}$, $\beta_{A_O A}$, $\gamma_{A_O A}$ – направляющие углы $\overrightarrow{A_O A}$;

$x_{A_O A}, y_{A_O A}, z_{A_O A}$ – проекции вектора $\overrightarrow{A_O A}$ на оси Ox, Oy, Oz, соответственно;

$T_{A_O A}$ – матрица элементарного смещения на вектор $\overrightarrow{A_O A}$, имеющая вид

$$T_{A_O A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_{A_O A} \\ 0 & 1 & 0 & y_{A_O A} \\ 0 & 0 & 1 & z_{A_O A} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Для вычисления координат точек B, C, D выполняется процедура регистрации обобщенных координат звеньев AB, BC, CD встроенными датчиками задающего устройства. Затем полученные координаты преобразуются в углы ориентации для соответствующих звеньев. Расчет пространственных координат точек B, C, D производится аналогично формулам (1), (2).

Координаты точки B:

$$\overrightarrow{AB} = \{l_{AB} \cdot \cos(\alpha_{AB}), l_{AB} \cdot \cos(\beta_{AB}), l_{AB} \cdot \cos(\gamma_{AB})\} = \{x_{AB}, y_{AB}, z_{AB}\}, \quad (3)$$

$$T_{AB} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_{AB} \\ 0 & 1 & 0 & y_{AB} \\ 0 & 0 & 1 & z_{AB} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} => B = T_{AB} \cdot A. \quad (4)$$

Координаты точки C:

$$\overrightarrow{BC} = \{l_{BC} \cdot \cos(\alpha_{BC}), l_{BC} \cdot \cos(\beta_{BC}), l_{BC} \cdot \cos(\gamma_{BC})\} = \{x_{BC}, y_{BC}, z_{BC}\}, \quad (5)$$

$$T_{BC} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_{BC} \\ 0 & 1 & 0 & y_{BC} \\ 0 & 0 & 1 & z_{BC} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} => C = T_{BC} \cdot B. \quad (6)$$

Координаты точки D:

$$\overrightarrow{CD} = \{l_{CD} \cdot \cos(\alpha_{CD}), l_{CD} \cdot \cos(\beta_{CD}), l_{CD} \cdot \cos(\gamma_{CD})\} = \{x_{CD}, y_{CD}, z_{CD}\}, \quad (7)$$

$$T_{CD} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_{CD} \\ 0 & 1 & 0 & y_{CD} \\ 0 & 0 & 1 & z_{CD} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} => D = T_{CD} \cdot C. \quad (8)$$

На этапе 2 рассчитаем пространственные координаты точек суставов руки оператора, находящихся в жесткой сцепке с задающим устройством.

Определим смещение $\overrightarrow{CC_O}$ относительно точки лучезапястного узла C для расчета координат лучезапястного сустава оператора $C_O(\mathrm{x}_{C_O}, \mathrm{y}_{C_O}, \mathrm{z}_{C_O})$:

$$\overrightarrow{CC_O} = \{l_{CC_O} \cdot \cos(\alpha_{CC_O}), l_{CC_O} \cdot \cos(\beta_{CC_O}), l_{CC_O} \cdot \cos(\gamma_{CC_O})\} = \{x_{CC_O}, y_{CC_O}, z_{CC_O}\}, \quad (9)$$

$$T_{CC_O} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_{CC_O} \\ 0 & 1 & 0 & y_{CC_O} \\ 0 & 0 & 1 & z_{CC_O} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} => C_O = T_{CC_O} \cdot C, \quad (10)$$

где

l_{CC_O} – длина сцепки CC_O; $\alpha_{CC_O}, \beta_{CC_O}, \gamma_{CC_O}$ – направляющие углы $\overrightarrow{CC_O}$;

$x_{CC_O}, y_{CC_O}, z_{CC_O}$ – проекции вектора $\overrightarrow{CC_O}$ на оси Ox, Oy, Oz, соответственно;

T_{CC_O} – матрица элементарного смещения на вектор $\overrightarrow{CC_O}$.

Координаты центра кисти оператора D_O определим смещением точки D рабочего окончания копирующего устройства на вектор $\overrightarrow{DD_O}$ жесткой сцепки по формулам:

$$\overrightarrow{DD_O} = \{l_{DD_O} \cdot \cos(\alpha_{DD_O}), l_{DD_O} \cdot \cos(\beta_{DD_O}), l_{DD_O} \cdot \cos(\gamma_{DD_O})\} = \{x_{DD_O}, y_{DD_O}, z_{DD_O}\}, \quad (11)$$

$$T_{DD_O} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_{DD_O} \\ 0 & 1 & 0 & y_{DD_O} \\ 0 & 0 & 1 & z_{DD_O} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} => D_O = T_{DD_O} \cdot D, \quad (12)$$

где

l_{DD_O} – длина сцепки DD_O; $\alpha_{DD_O}, \beta_{DD_O}, \gamma_{DD_O}$ – направляющие углы $\overrightarrow{DD_O}$;

$x_{DD_O}, y_{DD_O}, z_{DD_O}$ – проекции вектора $\overrightarrow{DD_O}$ на оси Ox, Oy, Oz, соответственно;

T_{DD_O} – матрица элементарного смещения на вектор $\overrightarrow{DD_O}$.

На этапе 3 производится расчет координат локтевого сустава руки оператора B_O на основе предлагаемого аналитического способа решения обратной задачи кинематики, что соответствует третьей задаче исследования.

Зная координаты точек A_O и C_O, произведем расчет длины вектора $\overrightarrow{A_O C_O}$ по формуле:

$$l_{A_O C_O} = \sqrt{(\mathrm{x}_{C_O} - \mathrm{x}_{A_O})^2 + (\mathrm{y}_{C_O} - \mathrm{y}_{A_O})^2 + (\mathrm{z}_{C_O} - \mathrm{z}_{A_O})^2}. \quad (13)$$

Т.к. длины частей руки оператора можно условно считать постоянными, множество возможных положений его локтя представляет собой окружность, описываемую точкой B_O при вращении вокруг прямой $A_O C_O$ (рис. 4). Центр данной окружности K_O может быть получен путем проведения высоты из точки B_O к стороне $A_O C_O$. Для нахождения его координат найдем радиус окружности $l_{K_O B_O}$ через площадь треугольника $A_O B_O C_O$:

$$l_{K_O B_O} = \frac{2}{l_{A_O C_O}} \sqrt{p(p - l_{A_O C_O})(p - l_{B_O C_O})(p - l_{A_O B_O})}, \quad (14)$$

$$p = \frac{l_{A_O C_O} + l_{B_O C_O} + l_{A_O B_O}}{2}, \quad (15)$$

где p – полупериметр треугольника $A_O B_O C_O$.

$$l_{A_O K_O} = \sqrt{l_{A_O B_O}^2 - l_{K_O B_O}^2}. \quad (17)$$

Координаты точки K_O могут быть найдены по формуле деления отрезка в заданном отношении:

$$\lambda = \frac{l_{A_O K_O}}{l_{A_O C_O} - l_{A_O K_O}}, \quad (18)$$

$$K_O = \left(\frac{x_{A_O} + \lambda x_{C_O}}{1+\lambda}; \frac{y_{A_O} + \lambda y_{C_O}}{1+\lambda}; \frac{z_{A_O} + \lambda z_{C_O}}{1+\lambda}\right). \quad (19)$$

Обозначенная на рисунке 4 окружность может быть найдена как пересечение сферы с центром в точке K_O и радиусом $l_{K_OB_O}$, и плоскости, перпендикулярной $\overrightarrow{A_OC_O}$, и проходящей через точку K_O:

$$\begin{cases} \left(x - \mathrm{x}_{K_O}\right)^2 + \left(\mathrm{y} - \mathrm{y}_{\mathrm{K}_O}\right)^2 + \left(z - z_{\mathrm{K}_O}\right)^2 = l_{K_OB_O}^2, \\ A_n x + B_n y + C_n z + D_n = 0, \end{cases} \quad (20)$$

$$A_n = x_{A_OC_O}, \quad (21)$$

$$B_n = y_{A_OC_O}, \quad (22)$$

$$C_n = z_{A_OC_O}, \quad (23)$$

$$D_n = -A_n \cdot x_{K_O} - B_n \cdot y_{K_O} - C_n \cdot z_{K_O}. \quad (24)$$

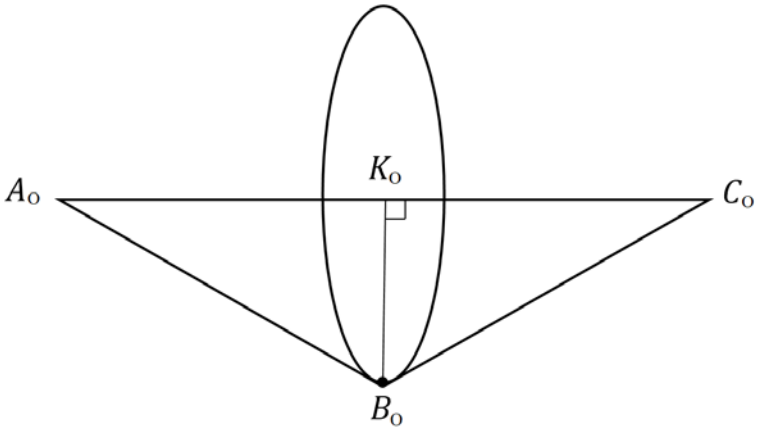


Рисунок 4 – Окружность, описываемая точкой B_O при вращении вокруг прямой A_OC_O

Согласно предлагаемому способу решения задачи предполагаем, что расстояние между сочленением B и суставом B_O постоянно. Тогда выбор положения точки B_O на окружности, описывающей возможные положения локтевого сустава человека, может быть произведен из условия нахождения общих точек пересечения со сферой с центром в точке B и радиусом l_{BB_O}. Данная сфера представлена на рисунке 5.

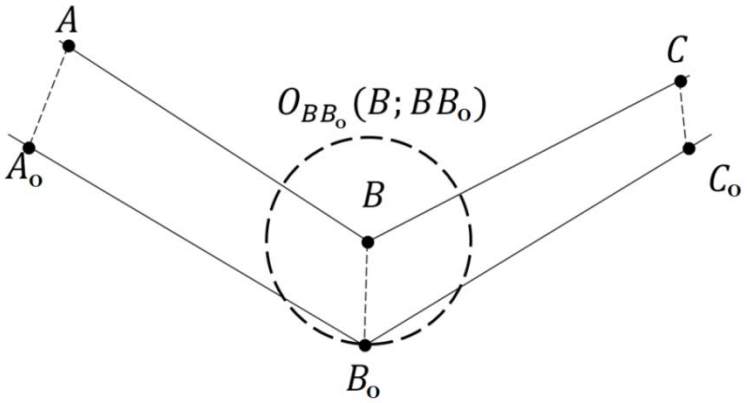


Рисунок 5 – Сфера возможных положений локтевого сустава при условии постоянного расстояния между локтевым суставом и локтевым сочленением

Уравнение рассматриваемой сферы имеет вид:

$$(x - x_B)^2 + (y - y_B)^2 + (z - z_B)^2 = {BB_O}^2 \quad (25)$$

Возможные точки положения локтевого сустава оператора B_O могут быть найдены как точки пересечения окружности, рассмотренной на рисунке 6, и сферы, представленной на рисунке 5 (рис. 6).

Таким образом, поиск координат возможного нахождения точки B_O производится путем решения системы нелинейных уравнений:

$$\begin{cases} \left(\mathrm{x}_{B_O} - \mathrm{x}_{K_O}\right)^2 + \left(\mathrm{y}_{B_O} - \mathrm{y}_{K_O}\right)^2 + \left(\mathrm{z}_{B_O} - \mathrm{z}_{K_O}\right)^2 = l_{K_O B_O}^2 \\ \left(\mathrm{x}_{B_O} - \mathrm{x}_B\right)^2 + \left(\mathrm{y}_{B_O} - \mathrm{y}_B\right)^2 + \left(\mathrm{z}_{B_O} - \mathrm{z}_B\right)^2 = l_{BB_O}^2 \\ A_n x + B_n y + C_n z + D_n = 0 \end{cases} \quad (26)$$

Данная система имеет аналитическое решение, которое позволяет в общем случае найти два корня (B_{O1} и B_{O2}). Выбор нахождения искомой точки B_O из двух возможных вариантов может выполняться из условия непрерывности перемещения локтя. Для этого в начале работы оператора с задающим устройством необходимо выбрать одну из двух рассчитанных точек положения локтевого сустава как наиболее соответствующую его реальному положению. Данный выбор можно осуществить вручную или с помощью постановки руки в некоторое предустановленное положение, в котором точка может быть выбрана автоматически.

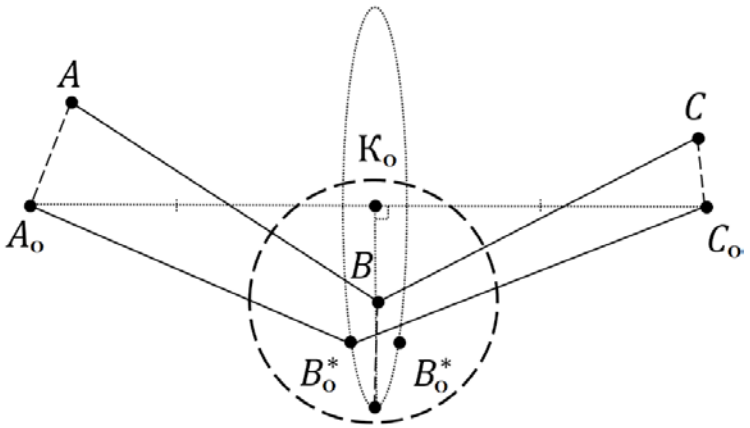


Рисунок 6 – Расположение точек B_O^* в пространстве как точек пересечения окружности и сферы

В процессе циклической работы алгоритма захвата движения выбор одной из двух точек производится из условия минимума расстояния до точки положения локтевого сустава, найденной на предыдущей итерации:

$$B_O^{(n+1)} = \begin{cases} B_{O1}^{(n+1)}, \text{если } \left|\overrightarrow{B_O^{(n)} B_{O1}^{(n+1)}}\right| \le \left|\overrightarrow{B_O^{(n)} B_{O2}^{(n+1)}}\right|, \\ B_{O2}^{(n+1)}, \text{если } \left|\overrightarrow{B_O^{(n)} B_{O1}^{(n+1)}}\right| > \left|\overrightarrow{B_O^{(n)} B_{O2}^{(n+1)}}\right|, \end{cases} \quad (27)$$

где

$B_O^{(n+1)}$ – положение локтя, вычисляемый на $n+1$-й итерации;

$B_{O1}^{(n+1)}$ – первый вариант положения локтя, вычисляемый на $n+1$-й итерации;

$B_{O2}^{(n+1)}$ – второй вариант положения локтя, вычисляемый на $n+1$-й итерации;

$B_O^{(n)}$ – положения локтя, вычисленное на n-й итерации.

Результаты

Иллюстрация работы алгоритма предлагаемой методики осуществлена на исходных данных, приведённых в таблице 1.

Таблица 1. Исходные данные для расчета

№	Описание	Исходные данные
1	Координаты точки плечевого сустава оператора	$A_O = (0; 0; 0)$

2	Длины звеньев руки оператора	$l_{A_OB_O} = l_{B_OC_O} = 0{,}350$
3	Длины звеньев задающего устройства	$l_{AB} = l_{BC} = l_{CD} = 0{,}269$
4	Направляющие углы жесткой сцепки	$(\alpha_{A_OA}, \beta_{A_OA}, \gamma_{A_OA}) = (68{,}199°; 42{,}031°; 56{,}145°)$ $(\alpha_{CC_O}, \beta_{CC_O}, \gamma_{CC_O}) = (68{,}199°; 56{,}145°; 137{,}969°)$ $(\alpha_{DD\text{ч}}, \beta_{DD\text{ч}}, \gamma_{DD\text{ч}}) = (60{,}983°; 60{,}983°; 136{,}686°)$
5	Углы ориентации звеньев задающего устройства	$(\alpha_{\text{AB}}, \alpha_{\text{BC}}, \alpha_{\text{CD}}) = (68{,}199°; 42{,}031°; 123{,}855°)$ $(\beta_{AB}, \beta_{\text{BC}}, \beta_{\text{CD}}) = (68{,}199°; 42{,}031°; 56{,}145°)$ $(\gamma_{\text{AB}}, \gamma_{\text{BC}}, \gamma_{\text{CD}}) = (42{,}031°; 68{,}199°; 56{,}145°)$

Результатами реализации этапа 1 являются рассчитанные по формулам (1) – (8) координаты точек сочленений A, B, C, D задающего устройства:

$A = (0{,}05; 0{,}1; 0{,}075);\ B = (0{,}15; 0{,}3; -0{,}075);\ C = (0{,}25; 0{,}5; 0{,}075);\ D = (0{,}45; 0{,}6; 0{,}225).$

Результатами реализации этапа 2 являются рассчитанные по формулам (9) – (12) координаты лучезапястного сустава C_O и центра кисти D_O руки оператора:

$$C_O = (0{,}3; 0{,}575; -0{,}025);\ D_O = (0{,}5; 0{,}65; 0{,}15).$$

Результатами реализации этапа 3 являются рассчитанные:

– по формуле (13) длина вектора $\overrightarrow{A_OC_O}$ =0,649;

– по формуле (19) координаты точки $K_O = (0{,}15; 0{,}288; -0{,}013)$;

– по найденные из системы уравнений (26) координаты точки $B_O = (0{,}225; 0{,}244; -0{,}111)$ ∨ $B_O = (0{,}057; 0{,}332; -0{,}094)$.

Результаты расчета узловых точек руки оператора и задающего устройства представлены на рисунке 7.

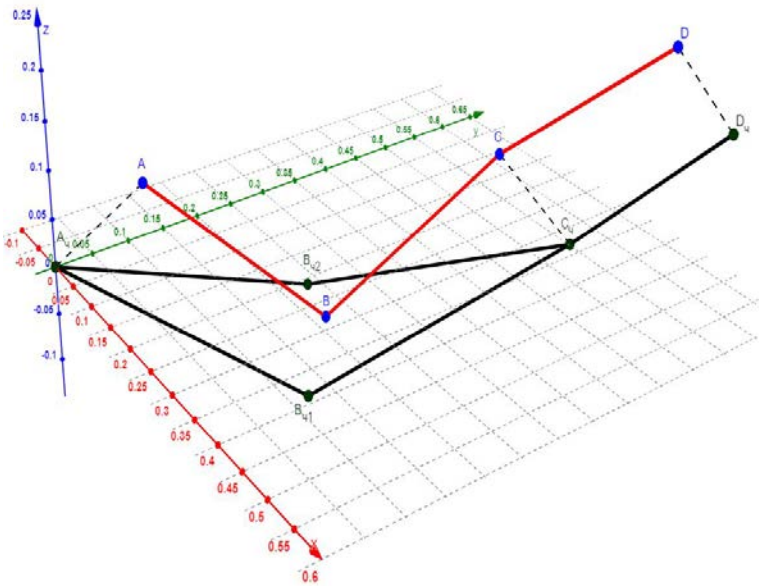


Рисунок 7 – Взаимоположение узловых точек руки оператора и задающего устройства

На рисунке 7 также представлены положения жестких сцепок между задающим устройством $ABCD$ и рукой оператора $A_O B_O C_O D_O$. Точки $A_O; B_{O1}; B_{O2}; C_O; D_O$ соответствуют узловым точкам руки оператора. Точки B_{O1} и B_{O2} являются двумя расчетными вариантами расположения локтевого сустава. Для оценки погрешности реализуемой методики была построена имитационная модель системы «Оператор – Экзоскелет» в пакете прикладных программ для решения задач технических вычислений MATLAB v.2017. Модель системы «Оператор-Экзоскелет» реализует кинематическую схему цепи, образованной рукой оператора и задающим устройством. Визуализация физической части разработанной модели представлена на рисунке 8.

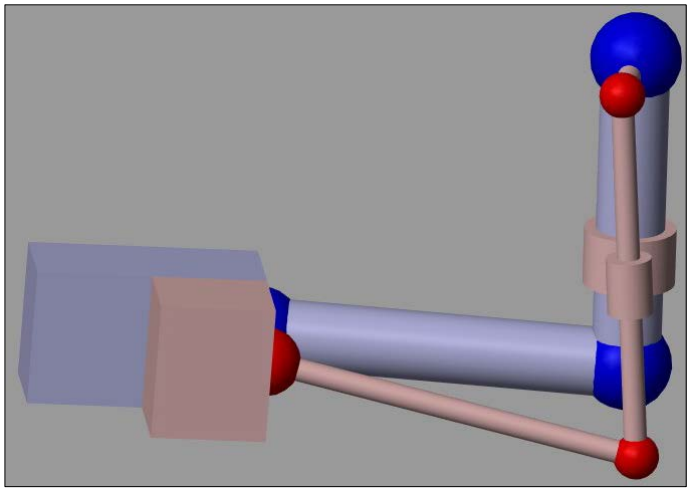


Рисунок 8 – Визуализация имитационной модели системы «Оператор – Экзоскелет» в среде MATLAB

С помощью разработанной модели проведем тестирование для оценки точности вычисления декартовых координат суставов руки оператора по предложенному алгоритму. В качестве метрики точности примем расстояние между расчетной и реальной точками расположения сустава руки оператора в пространстве (Евклидову норму). В условиях разработанной модели для предложенной методики погрешность расчета положения плечевого сустава, лучезапястного сустава и центра кисти определяется исключительно вычислительной погрешностью.

Для сравнения точности расчета с выбранным аналогом на вход имитационной модели поданы тестовые векторы, описанные ранее, и выполнена регистрация пространственных координат локтевого сустава руки оператора, локтевого сочленения экзоскелета и пространственных координат, рассчитанных по предложенной методике.

На рассматриваемую точность оказывает влияние выбор длины виртуальной сцепки BB_o, которая является неизвестной заранее величиной. Для её определения проведем указанное тестирование для различных вариантов длины. Результаты тестирования представлены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты моделирования

Длина виртуальной сцепки BB_o, см	Погрешность выбранного аналога		Погрешность предложенной методики	
	Среднее, см	Отклонение, см	Среднее, см	Отклонение, см
8,0	9,45	0,32	-	-
9,0			0,58	0,43
10,0			0,64	0,34
11,0			1,76	0,31
12,0			2,85	0,28

Для длины сцепки, равной 8,0 см, при некоторых тестовых векторах не существует решений для системы уравнений, лежащей в основе методики. Дальнейшее уменьшение данного расстояния не является целесообразным.

Заключение

Предложенная в работе методика позволяет свести методическую погрешность расчета пространственного положения плечевого сустава, лучезапястного сустава и центра кисти оператора к вычислительной погрешности. При этом методическая погрешность определения пространственного положения локтевого сустава снижается с 9,45 см до 2,85 см. В результате практического применения разработанной методики может быть повышена синхронность движений оператора и манипулятора, что позволит уменьшить время, затрачиваемое оператором на выполнение целевых операций, а также снизить вероятность столкновения манипулятора с препятствиями.

Исследование выполнено в рамках реализации научного проекта по теме «Разработка программно-аппаратного комплекса системы управления на основе решения обратной задачи динамики и кинематики» в рамках ФЦПИР 2014-2020 (уникальный идентификатор RFMEFI57517X0166) при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации.

1. Роботы и робототехнические устройства. Методы программирования и взаимодействия с оператором: ГОСТ Р 60.0.7.1-2016; введ. 01.01.2018.
2. Cempini M., De Rossi S.M.M., Lenzi T., Vitiello N., Carrozza M.C. Self–alignment mechanisms for assistive wearable robots: A kinetostatic compatibility method // IEEE Transactions on Robotics. 2013. 29(1). Pages 236-250.
3. Yu W., Rosen J., Li X. PID admittance control for an upper limb exoskeleton // PID admittance control for an upper limb exoskeleton. 2011. Pages 1124-1129.
4. Margineanu, D., Lovasz, E.-C., Gruescu, C.M., Ciupe, V., Tatar, S. 5 DoF haptic exoskeleton for space telerobotics – Shoulder module (2018) Mechanisms and Machine Science, 52, pp. 111-120.
5. Yajima, S., Katsura, S. Multi-DOF motion reproduction using motion-copying system with velocity constraint. – (2014) IEEE Transactions on Industrial Electronics, 61 (7), статья № 6636073, pp. 3765-3775.
6. Kuo C., Dai J.S. Kinematics of a Fully–Decoupled Remote Center-of-Motion Parallel Manipulator for Minimally Invasive Surgery // Journal of Medical Devices, Transactions of the ASME. 2012.
7. Gams, A., Petric, T., Do, M., Nemec, B., Morimoto, J., Asfour, T., Ude, A. Adaptation and coaching of periodic motion primitives through physical and visual interaction. - (2016) Robotics and Autonomous Systems, 75, pp. 340-351.
8. Chen, Y., Chen, Q. Real-time self-collision avoidance for humanoid robot based on dynamic task-prior system. (2014) International Journal of Robotics and Automation, 29 (3), pp. 234-244.
9. Jia, Q., Zhang, Q., Gao, X., Chen, G., Song, J. Dynamic obstacle avoidance algorithm for redundant robots with pre-selected minimum distance index. (2013) Jiqiren/Robot, 35 (1), pp. 17-22.
10. Zhou, S., Wu, X., Qi, Y., Gong, W. Visual location method of indoor mobile robot based on beeline detection. (2016) Huazhong Keji Daxue Xuebao (Ziran Kexue Ban)/Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 44 (10), pp. 93-97.
11. Cholewa, A., Świder, J., Zbilski, A. Verification of forward kinematics of the numerical and analytical model of Fanuc AM100iB robot. (2016) IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 145 (5), статья № 052001.
12. Flores-Abad, A., Ma, O., Pham, K., Ulrich, S. A review of space robotics technologies for on-orbit servicing. (2014) Progress in Aerospace Sciences, 68, pp. 1-26.
13. Wang, M., Luo, J., Yuan, J., Walter, U. Detumbling strategy and coordination control of kinematically redundant space robot after capturing a tumbling target. (2018) Nonlinear Dynamics, pp. 1-21.
14. Shi, Z., Huang, X., Hu, T. Human motion capture similarity control for space teleoperation. (2018) Lecture Notes in Electrical Engineering, 445, pp. 263-279.
15. Megalingam, R.K., Vivek, G.V., Bandyopadhyay, S., Rahi, M.J. Robotic arm design, development and control for agriculture applications. (2017) 4th International Conference on Advanced Computing and Communication Systems, ICACCS 2017, № 8014623.

16. Vasiljevic, G., Jagodin, N., Kovacic, Z. Kinect-based robot teleoperation by velocities control in the joint / Cartesian frames (2012) IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline), pp. 805-810.
17. Kim, H., Kim, J. Control of the seven-degree-of-freedom upper limb exoskeleton for an improved human-robot interface. (2017) Journal of the Korean Physical Society, 70 (7), pp. 726-734.
18. Kim, H., Roldan, J.R., Li, Z., Rosen, J. Viscoelastic model for redundancy resolution of the human arm via the swivel angle: Applications for upper limb exoskeleton control. (2012) Proceedings of the Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, EMBS, статья № 6347476, pp. 6471-6474.
19. Kim, H., Lee, C.-Y. Analysis on kinematics and dynamics of human arm movement toward upper limb exoskeleton robot control part 1: System model and kinematic constraint. (2012) Journal of Institute of Control, Robotics and Systems, 18 (12), pp. 1106-1114.
20. Kim, H., Miller, L.M., Byl, N., Abrams, G.M., Rosen, J. Redundancy resolution of the human arm and an upper limb exoskeleton. (2012) IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 59 (6), статья № 2194489, pp. 1770-1779.
21. Sychkov, V.B., Bogdanov, A.A., Saprykin, O.A., Grebenshikov, A.V. Special robotics for cosmonauts support on the international space station and perspective orbital stations applying (2016) Proceedings of the International Astronautical Congress, IAC.
22. Модуль «Задающее устройство копирующего типа» // НПО АНДРОИДНАЯ ТЕХНИКА URL: https://npo-at.com/products/«аватар»/ (дата обращения: 25.03.2018 г.).
23. Каталог продукции // НПО АНДРОИДНАЯ ТЕХНИКА URL: https://npo-at.com/products/каталог-продукции/ (дата обращения: 25.03.2018 г.).

A.V. Safonov[1,2], A.N. Yusupov[2], A.V. Lopota[1,2]

AN ALGORITHM FOR AUTO TUNING OF DIGITAL CONTROLLERS FOR MECHATRONIC MODULES WITH SPACE APPLICATIONS

[1]SPbPU, [2]Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics, Saint-Petersburg
a.safonov@rtc.ru, a.n.yusupov@gmail.com, alopota@rtc.ru

Abstract

The analysis of the operating modes of the mechatronic modules drives in the extreme conditions of the open space is very difficult, since it is impossible to track in real time changes of environment parameters and drive parameters because the modules are inaccessible for the direct measurements. The problem can be solved if the drives control system is tuning via using on-board software without human intervention, directly during the running of modules in space.

Significant for such automatic tuning is the problem of estimation the quality of control using software based on data of drive sensors. The article suggest a method of automatic estimation the transient response quality in the drive control system. Also, the article describe based for this method algorithm for digital controller self-tuning, which allows the drive to adjust to the changing operating conditions.

Key words: space engineering, electric motor, self-tuning, transient process, quality criteria, control.

А.В. Сафонов[1,2], А.Н. Юсупов[2], А.В. Лопота[1,2]

АЛГОРИТМ САМОНАСТРОЙКИ ЦИФРОВЫХ РЕГУЛЯТОРОВ ДЛЯ МЕХАТРОННЫХ МОДУЛЕЙ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

[1]СПбПУ, [2]ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург
a.safonov@rtc.ru, a.n.yusupov@gmail.com, alopota@rtc.ru

Аннотация

Анализ режимов работы приводов мехатронных модулей в экстремальных условиях открытого космоса существенно затруднен, т.к. отследить изменения параметров окружающей среды и параметров привода в режиме реального времени невозможно из-за недоступности модулей для

непосредственных измерений. Эту проблему можно исключить, если осуществлять настройку системы управления приводами с помощью бортового ПО без участия человека, непосредственно в процессе эксплуатации модулей в космосе.

Для такой автоматической настройки существенным моментом является проблема оценки качества управления программными методами на основании данных сенсорной подсистемы привода. В настоящей статье предлагается метод автоматической оценки качества переходного процесса в системе управления приводом. Также в статье описывается реализованный на основе данного метода поисковый алгоритм самонастройки цифрового регулятора, позволяющий приводу перестроиться под изменившиеся условия работы.

Ключевые слова: космическая техника, электропривод, самонастройка, переходный процесс, критерий качества, управление.

Введение

Одна из главных проблем проектирования мехатронных модулей для работы в космосе – их удаленность, недоступность для непосредственных манипуляций. Крайне затруднена либо отсутствует возможность проанализировать условия окружающей среды, в которых функционирует модуль [1-4]. Не менее сложно отследить параметры самого привода, рассмотреть ход работы на нижних уровнях системы управления (СУ) приводами модулей или вмешаться в их работу. Однако это необходимо для качественной настройки регуляторов. Дополнительную сложность создает изменчивость как параметров среды, так и самого привода, – система, которая удовлетворительно работала в условиях, на которых производилась настройка, может не справиться со своими задачами при новых параметрах. Возникает необходимость перестройки алгоритма управления.

Данная проблема может быть решена, если использовать в бортовой СУ верхнего уровня алгоритм, который берет на себя задачу проектировщика по настройке и перестройке в изменившихся условиях СУ приводами модулей [5]. Он позволит осуществлять настройку не на Земле, в условиях, лишь приблизительно имитирующих космические, а в реальной обстановке, в которой предполагается функционирование модуля. Также такой алгоритм позволит вовремя зафиксировать изменение условий работы, вызванное этим снижение качества управления и перестроить СУ приводного уровня.

В данной статье описывается подобный алгоритм, осуществляющий автоматическую настройку СУ приводом, представляющую собой простой двухконтурный цифровой регулятор, с внешним контуром скорости и подчиненным ему внутренним контуром тока. Каждый контур состоит из цифрового регулятора и петли обратной связи с цифровым датчиком соответствующей переменной, что согласуется с современными принципами аппаратурного построения СУ приводами. Такие СУ сегодня, главным образом, реализуются на базе микроконтроллеров; датчику тока в описанной схеме соответствует АЦП, на который поступает аналоговый сигнал с токового шунта, датчику скорости – таймер, фиксирующий отсчеты инкрементального или квадратурного энкодера [6].

Цифровой регулятор, рассматриваемый в данной статье, представляет собой модифицированный ПИ-регулятор. Его схема изображена на рис. 1. От обычного ПИ-регулятора его отличает наличие дополнительной обратной связи, а также наличие фильтра первого порядка в цепи обратной связи. Дополнительная обратная связь позволяет уменьшить перерегулирование при отсутствии или малом значении нагрузки. Методика настройки данного регулятора состоит из трех этапов:

– 1-й этап – подбор постоянной времени фильтра T. На данном этапе необходимо соблюсти компромисс между ослаблением шума и быстродействием;

– 2-й этап – подбор пропорционального коэффициента K_p. На данном этапе структура регулятора должна соответствовать П-регулятору, используется стандартный алгоритм подбора пропорционального коэффициента;

– 3-й этап – подбор интегрального коэффициента K_i. Перед настройкой структура регулятора приводится к модифицированному виду: вводится дополнительная обратная связь, а пропорциональный коэффициент уменьшается в два раза. После чего по стандартному алгоритму подбирается интегральный коэффициент.

В данной работе рассматриваются 2-й и 3-й этапы настройки, фильтр считается настроенным.

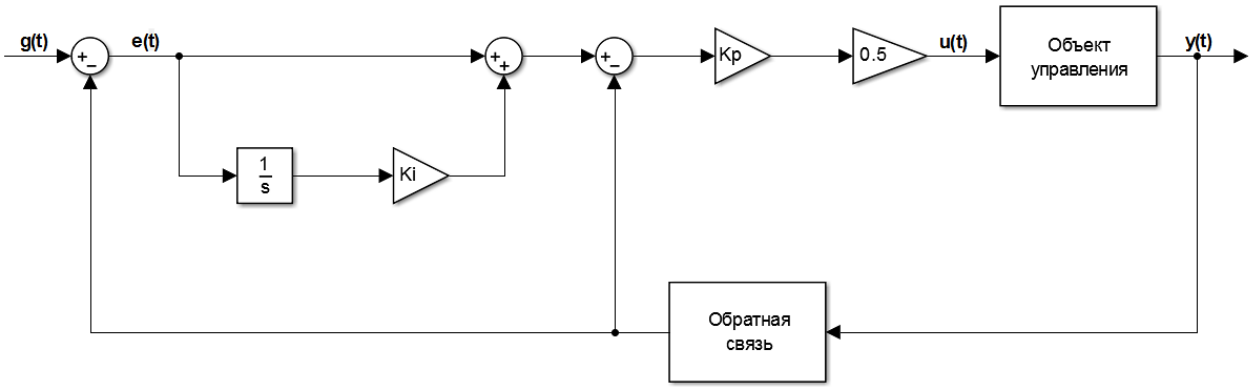


Рисунок 1 – Структурная схема модифицированного ПИ-регулятора

Критерии качества переходных процессов

Качество переходного процесса в системе стабилизации скорости электропривода можно оценить с помощью следующих тривиальных критериев:

– точность, ее можно определить как малость ошибки в установившемся режиме;

– быстродействие, время регулирования – временной интервал от момента подачи задающего воздействия до момента, после которого ошибка не превосходит некоторого заданного допускаемого значения $e_{уст}$;

– малость перерегулирования.

Существенным при настройке является тот факт, что данные критерии во многих случаях противоречат друг другу; при изменении коэффициента регулятора качество получившегося переходного процесса может повыситься по одному из критериев и понизиться по какому-либо другому. Рассмотрим эту проблему на примере контура тока.

При повышении пропорционального или интегрального коэффициента регулируемая переменная быстрее выходит на установившийся режим, при этом точность повышается. Однако при определенном значении коэффициента появляется перерегулирование, которое растет с увеличением коэффициента (при дальнейшем увеличении переходный процесс становится сильно колебательным и начинает расходиться). Имеем противоречие между критериями точности и быстродействия с одной стороны и критерием малости перерегулирования. Данную ситуацию иллюстрирует рис. 2.

Процесс настройки регулятора, таким образом, представляется как поиск компромиссного значения коэффициентов регулятора, обеспечивающего приемлемое выполнение всех критериев качества.

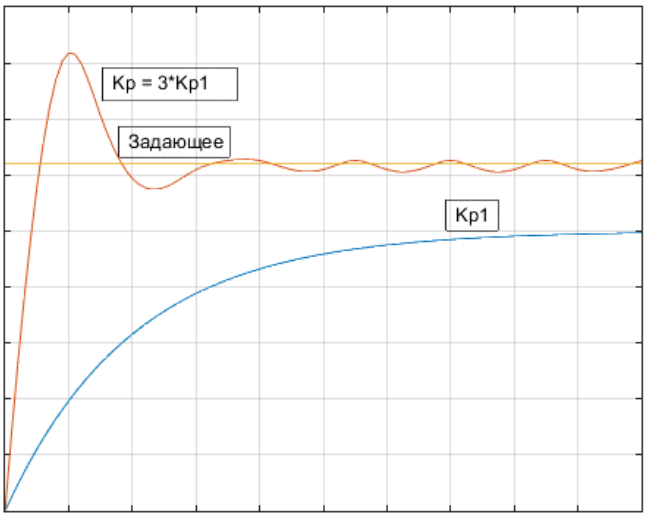


Рисунок 2 – Иллюстрация противоречия между критериями качества

Общий ход процесса самонастройки

Процесс самонастройки является итерационным. На каждой итерации осуществляются следующие процедуры:

1) тестовый «прогон» системы – отработка системой ступенчатого задающего воздействия из состояния покоя и запись информации о переходном процессе (на временном интервале, одинаковом для каждой итерации);

2) оценка качества полученного переходного процесса;

3) модификация настраиваемого коэффициента регулятора на основании проведенной оценки качества.

Коэффициенты регулятора настраиваются в следующем порядке:

1) пропорциональный коэффициент контура управления током;

2) интегральный коэффициент контура управления током;

3) пропорциональный коэффициент контура управления скоростью;

4) интегральный коэффициент контура управления скоростью.

Перед началом настройки все коэффициенты равны нулю. Процесс самонастройки осуществляется с опорой на следующие эвристические правила:

– пропорциональный коэффициент повышается до тех пор, пока перерегулирование не превысит допустимой величины – это позволит обеспечить максимально возможное быстродействие;

– точность управления обеспечивается интегральной составляющей регулятора; интегральный коэффициент следует повышать, пока в установившемся процессе не проявятся незатухающие автоколебания.

Алгоритм оценки качества переходного процесса

Как отмечалось выше, переходный процесс можно количественно оценить по разным параметрам. На практике часто используются интегральные критерии качества, имеющие вид:

$$I = \int_0^T \sum_{k=1}^{n} c_k \cdot f_k(t)\, dt,$$

где

$f_k(t)$ – различные функции, отражающие элементарные критерии качества, (например, ошибка управления как мера точности);

c_k – наперед заданные весовое коэффициенты, отражающие значимость соответствующего критерия [7].

Применение таких критериев дополнительно требует подбора весовых коэффициентов, что увеличивает трудоемкость настройки. По этой причине в настоящей работе оценка качества производилась преимущественно бинарными критериями типа «условие выполнено – условие не выполнено».

Алгоритм, оценивающий качество переходного процесса, получает на вход массив отсчетов управляемой переменной с момента подачи управляющего воздействия с фиксированным интервалом дискретизации и возвращает на выход структуру со значениями критериев качества. Эта структура имеет следующие параметры:

– условие завершенности переходного процесса – бинарный критерий;

– условие малости дисперсии установившегося процесса – бинарный критерий;

– условие малости перерегулирования относительно задающего значения – бинарный критерий;

– условие малости перерегулирования относительно установившегося значения – бинарный критерий;

– оценка по быстродействию;

– оценка по ошибке – максимальное значение ошибки управления в установившемся режиме;

– оценка по интегральной ошибке – среднее значение ошибки за всю выборку;

– оценка по перерегулированию относительно задающего значения – абсолютное значение перерегулирования, рассчитанное как разница максимального значения управляемой переменной в пришедшей на вход выборке и задающего;

– оценка по перерегулированию относительно установившегося значения – рассчитывается как разница максимального значения управляемой переменной и установившегося значения.

Основная часть алгоритма – перебор всех точек переходного процесса, в ходе которого выполняются все вычисления и проверки условий, необходимые для того, чтобы получить значения

полей этой структуры. При этом вся выборка разбивается на два равных временных интервала – начальный и конечный. Предполагается, что переходный процесс завершается в начальном интервале; конечный интервал, таким образом, рассматривается как установившийся процесс.

В реакции системы на управляющее воздействие могут присутствовать расходящиеся колебания с медленно нарастающей амплитудой. При этом, если траектория переходного процесса пролегает вблизи установившегося значения, требуется определенное время, чтобы такие колебания проявились. Поэтому предполагаемому установившемуся процессу отводится столь большая часть выборки – длительное «наблюдение» управляемой переменной позволяет с большей уверенностью заключить, что переходный процесс действительно установился.

Установившееся значение управляемой переменной определяется как среднее арифметическое по всем точкам установившегося процесса. С помощью этого значения вычисляются два количественных критерия – точность и перерегулирование относительно установившегося значения.

Для определения условия завершенности на каждой итерации цикла перебора формируется «окно» значений управляемой переменной. Окно представляет собой массив из значений переменной в текущей и N (последовательных) предыдущих точках. Количество точек в этом окне фиксировано за исключением первых N точек, в которых, очевидно, количества предыдущих точек не достаточно. Величина N является параметром алгоритма. В настоящей работе N всегда принималось как 1/6 от общего количества точек в выборке (округление в сторону нуля). Зависимость работы алгоритма от вариаций параметра N не исследовалась.

Начиная с точки $N+1$ для «окна» значений переменной y вычисляется среднее арифметическое E_α, таким образом, формируется функция скользящего среднего:

$$E_\alpha = \frac{1}{N+1} \cdot \sum_{k=\alpha-N}^{\alpha} y_k \ .$$

Для всех точек установившегося процесса при переборе фиксируются предельные значения $E_{\alpha\,\max}$ и $E_{\alpha\,\min}$. Условие завершенности принимает значение «истина» тогда и только тогда, когда выполняется следующее условие:

$$E_{\alpha\,\max} - E_{\alpha\,\min} \le \Delta E_\alpha \ ,$$

где ΔE_α – наперед заданный допуск, являющийся параметром алгоритма.

Условие малости дисперсии, очевидным образом, принимает значение «истина», тогда и только тогда, когда максимальное значение D_α не превышает максимально допустимого значения, определяемого следующим соотношением:

$$D_{\max} = \frac{e_{\max}^2}{2} .$$

Вычисление дисперсии позволяет выявить наличие автоколебаний в установившемся режиме.

На каждой итерации перебора алгоритм производит следующие действия:

– для всех точек:
  1) проверка на превышение перерегулирования относительно задающего значения и выход из цикла при наличии превышения (в этом случае дальнейший перебор не требуется, т.к. процесс, очевидно, неудовлетворительный);
  2) обновление максимального найденного значения;
  3) вычисление ошибки;
  4) накопление интегральной ошибки;
– для первых $N+1$ точек: добавление текущей точки в «окно»;
– для оставшихся точек (условного) переходного процесса:
  1) обновление «окна» – добавление текущей точки и удаление самой старой;
  2) вычисление скользящего среднего;
– для точек (условного) установившегося процесса:
  1) обновление «окна»;
  2) вычисление скользящего среднего и дисперсии;
  3) сравнение среднего с ранее найденными максимальным и минимальным значениями, обновление этих значений; если их разность превысила допуск – выход из цикла;
  4) обновление значения максимальной ошибки;
  5) накопление установившегося значения.

Установившееся значение рассчитывается непосредственно в теле цикла на каждой итерации по следующей формуле:

$$y_{\text{уст}} := y_{\text{уст}} + \frac{1}{N_{\text{уст}}} \cdot y_{\text{тек}},$$

где

$y_{\text{уст}}$ – переменная, в которой накапливается установившееся значение;

$y_{\text{тек}}$ – текущее значение переменной;

$N_{\text{уст}}$ – количество точек выборки, рассматриваемых как установившееся значение.

Валидное значение переменная $y_{\text{уст}}$ получает только по завершении цикла. Аналогичным образом рассчитывается интегральная ошибка.

По завершении цикла рассчитывается перерегулирование относительно установившегося значения и дисперсия в установившемся процессе.

Описание алгоритма самонастройки и его реализации

Работа алгоритма состоит из двух последовательно выполняющихся этапов: «быстрый поиск» и «уточняющий поиск». Настройка каждого коэффициента регулятора начинается с этапа быстрого поиска. На этом этапе значение коэффициента удваивается каждую итерацию. Быстрый поиск прекращается при выполнении одного из двух условий:

a)на новой итерации переходный процесс стал неудовлетворительным;

b) на новой итерации переходный процесс, будучи удовлетворительным, существенно не изменился, и дальнейшее увеличение коэффициента нецелесообразно.

Условие a) выполнено, если справедливо одно из следующих утверждений:

1) перестало выполняться условие завершенности переходного процесса, при этом ошибка управления на предыдущей итерации не превышала допустимой. Это может свидетельствовать о том, что система начинает «идти в разнос». Дополнительное условие с ошибкой управления необходимо, поскольку на ранних итерациях настройки интегральных коэффициентов переходный процесс может завершаться далеко от задающего значения, а при увеличении коэффициента рост переменной ускоряется, и в новой выборке процесс не успевает установиться;

2) перестало выполняться условие малости дисперсии. Это может свидетельствовать о появлении существенных колебаний;

3) перестало выполняться условие малости перерегулирования. Здесь проверка условия может быть проведена в двух вариантах – «жестком», когда используется перерегулирование относительно задающего значения, и «мягком», когда используется перерегулирование относительно установившегося значения. «Мягкий» вариант имеет смысл применять при настройке пропорциональных коэффициентов, поскольку существенное перерегулирование и проявляющиеся впоследствии сильные колебания могут возникнуть на ранних итерациях, когда установившееся значение далеко от задающего. В таком случае увеличение пропорционального коэффициента нецелесообразно, а статическая ошибка должна быть нивелирована интегральной составляющей.

Условие b) выполнено, если разница интегральных ошибок для текущей и предыдущей итераций не превышает величины $\Delta_{\text{доп}}$:

$$\Delta_{\text{доп}} := \frac{q}{N},$$

где

q – квант величины управляемой переменной (разрешение датчика);

N – количество точек в выборке.

По завершении быстрого поиска алгоритм начинает осуществлять уточняющий поиск. Его суть заключается в переборе значений в диапазоне $K_{\text{неуд}} < K < K_{\text{уд}}$, где $K_{\text{неуд}}$ – коэффициент, на котором переходный процесс был признан неудовлетворительным, и прекратился быстрый поиск; $K_{\text{уд}}$ – предыдущий коэффициент, являющийся последним удовлетворительным.

Модификация коэффициента при уточняющем поиске производится по следующим формулам. Для удовлетворительного процесса (что определяется по тем же критериям, что и критерии прекращения быстрого поиска):

$$K_{N+1} = K_N + h \cdot K_{\text{уд}}.$$

Для неудовлетворительного процесса:

$$K_{N+1} = K_{N-1}.$$

Здесь h – относительная точность. Для быстрого поиска $h = 2$. В ходе уточняющего поиска относительная точность уменьшается на каждой итерации в два раза перед модификацией

коэффициента. Алгоритм прекращает работу, как только относительная точность принимает значение, меньшее некоторой величины $h_{\min}$. В настоящей работе принято $h_{\min} = 1/32$.

Таким образом, уточняющий поиск определяет верхнюю границу настраиваемого коэффициента, за которым работа системы становится неудовлетворительной. Результатом работы поиска становится максимально допустимый коэффициент.

Экспериментальная проверка работы алгоритма

Экспериментальная проверка осуществлялась на имитационной модели электропривода с волновым редуктором, с учетом сухого и влажного трения, а также шума измерения тока. При проверке использовалось задающее значение скорости ω = 500 рад/с. Рис. 3 иллюстрирует ход и результат работы алгоритма при настройке пропорционального коэффициента контура тока.

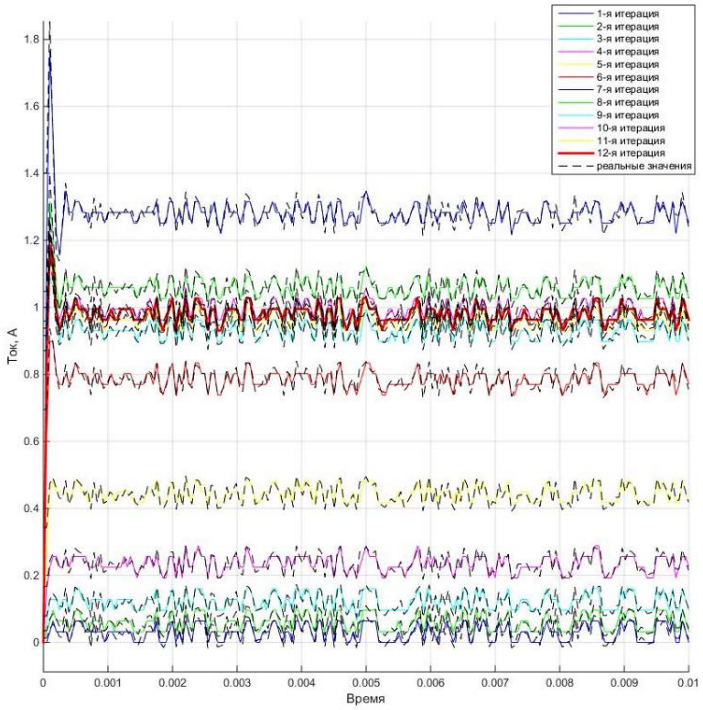


Рисунок 3 – Ход настройки пропорционального коэффициента контура тока

Рис. 4-6 демонстрируют работу алгоритма при настройке коэффициентов контура скорости и соответствующий результат.

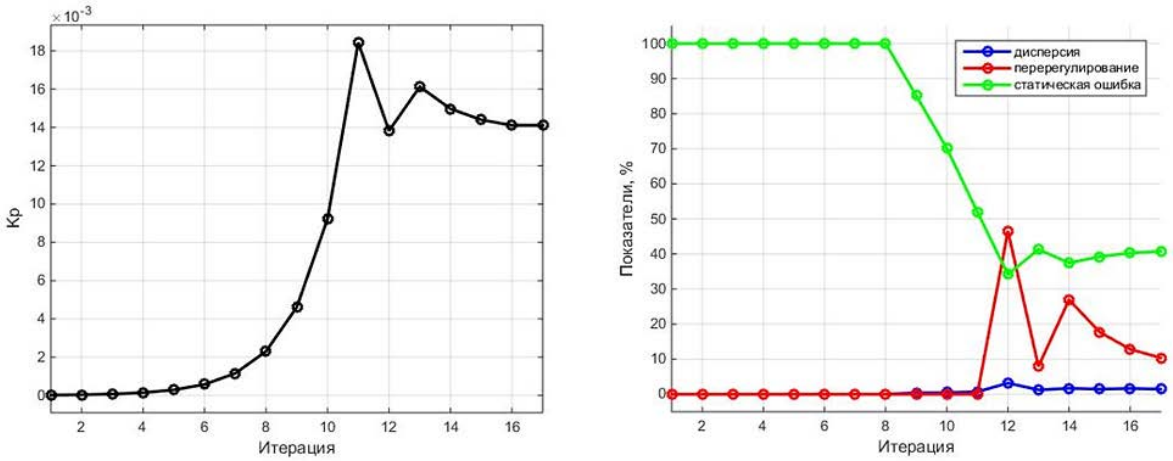


Рисунок 4 – Работа алгоритма при настройке пропорционального коэффициента контура скорости

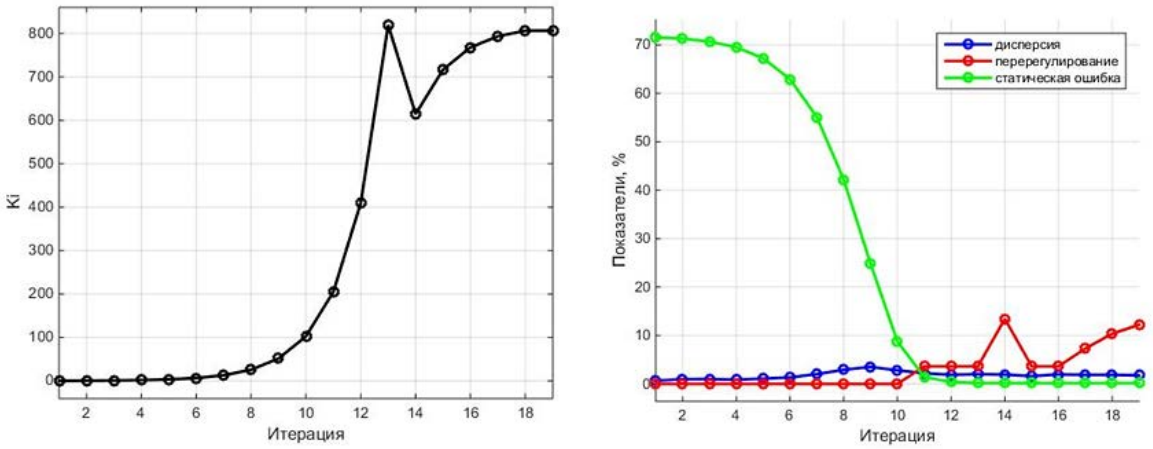


Рисунок 5 – Работа алгоритма при настройке интегрального коэффициента контура скорости

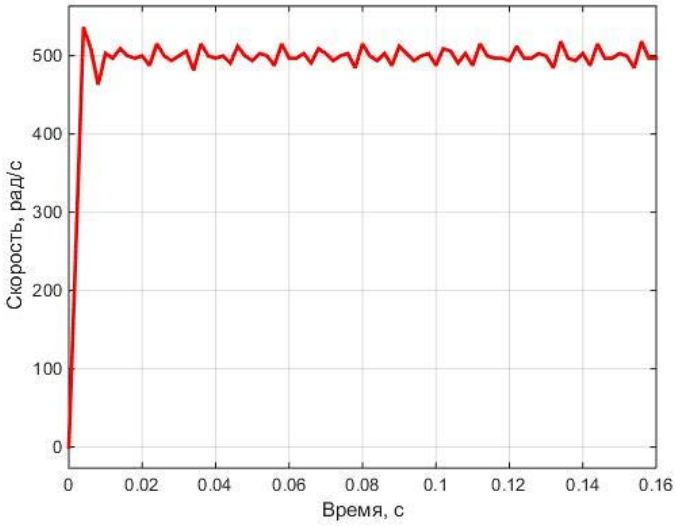


Рисунок 6 – Отработка скорости ω = 500 рад/с при настроенном регуляторе

В рамках работы проведен натурный эксперимент, в ходе которого осуществлялась самонастройка контура управления скоростью в электроприводе младшей степени 6-звенной манипуляционной робототехнической системы. Привод реализован на базе вентильного электродвигателя с аппаратным регулятором тока. Задающее значение скорости ω = 1 °/с. В ходе настройки получены следующие значения коэффициентов: K_p = 256, K_i = 7. Рис. 7-9 демонстрируют ход и результат работы алгоритма.

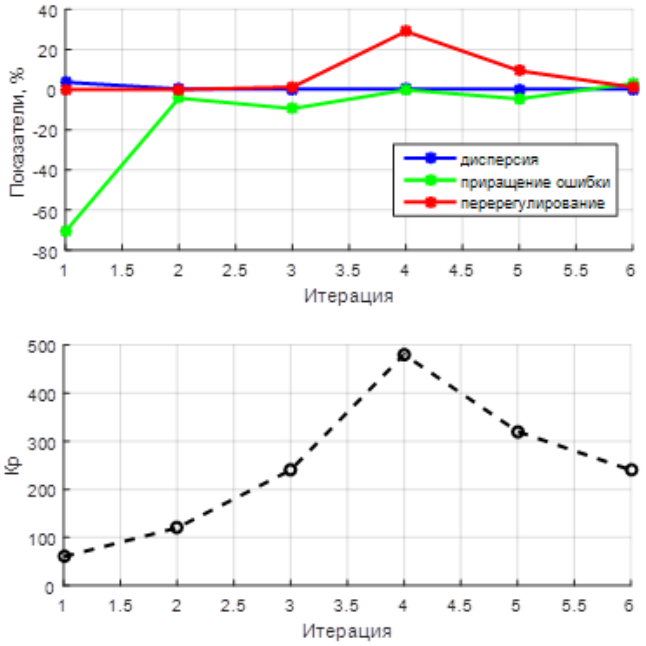


Рисунок 7 – Работа алгоритма при настройке пропорционального коэффициента контура скорости

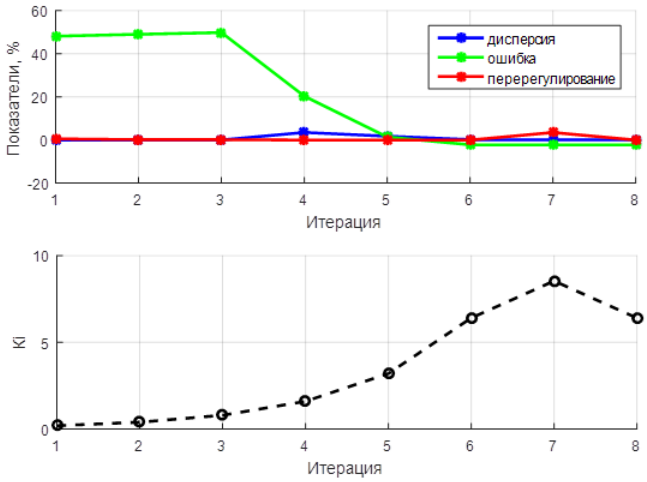


Рисунок 8 – Работа алгоритма при настройке интегрального коэффициента контура скорости

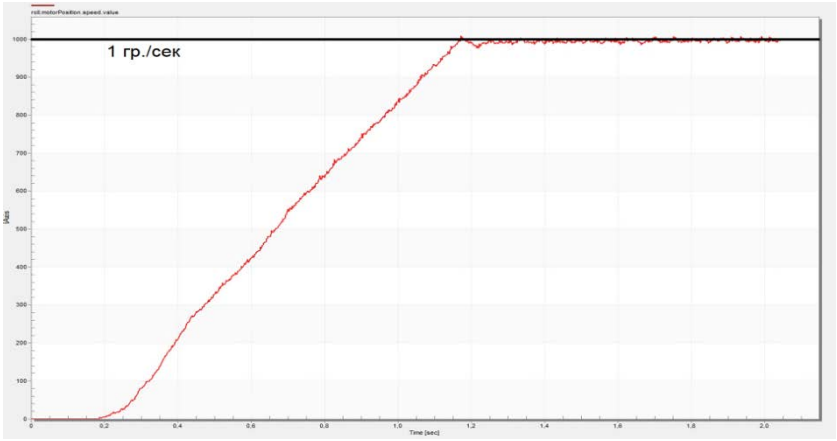


Рисунок 9 – Отработка скорости ω = 1 °/с при настроенном регуляторе

Результаты компьютерного моделирования и натурного эксперимента подтверждают работоспособность разработанного алгоритма, – настроенный регулятор позволяет управлять скоростью электропривода с высокой точностью за приемлемое время и с малым перерегулированием.

1. Васильев С.Н., Филимонов Н.Б., и др. Проблемы управления сложными динамическими объектами авиационной и космической техники. М.: Машиностроение, 2015.
2. Лесков А.Г., Илларионов В.В., Лескова С.М. Полунатурный функционально-моделирующий стенд в задачах исследования и подготовки операторов космических манипуляционных роботов // Вестник МГТУ им. Баумана. Серия «Машиностроение», Спецвыпуск: Экспериментальные исследования перспективных материалов, конструкций и систем, 2011, стр. 100-118.
3. Евтеева Е.В. Применение мехатронных систем в специальных и агрессивных средах // Вестник Волжского университета им. В.Н. Татищева, 2010.
4. Ф.М. Кулаков. Копирующее и супервизорное управление роботами при большом запаздывании сигналов управления и обратной связи // Робототехника и техническая кибернетика, № 1(10), 2016, стр. 55-61.
5. Козаченко В.Ф. Основные тенденции развития встроенных систем управления двигателями и требования к микроконтроллерам // Сайт chipnews.ru. (http://www.chipnews.ru/html.cgi/arhiv/99_01/stat_2.htm). Просмотрено 20.03.2018.
6. Булатов И.А., Романов А.В., Фролов Ю.М. Адаптивное управление электроприводом // Электротехнические комплексы, 2008.
7. В.Б. Колмановский. Задачи оптимального управления // Соросовский образовательный журнал, № 6, 1997, стр. 121-127.

A.V. Ivanov, V.M. Rulevskiy, N.N. Tsebenko

SISTEM OF CONTROL AND MANAGEMENT FOR COSMOBOT BATTERY

Research Institute of automatics and electromechanics «NII AEM TUSUR», Tomsk
ivanovnii@sibmail.com, rulevsky@niiaem.tomsk.ru, tnn@niiaem.tomsk.ru

Abstract

In the article is given a description of the sistem of control and management intended for operation in the lithium-ion battery of the cosmobot.

Key words: parameter control, lithium-ion rechargeable battery, cell equalization, cosmobot.

А.В. Иванов, В.М. Рулевский, Н.Н. Цебенко

СИСТЕМА КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕИ КОСМОРОБОТА

Научно-исследовательский институт автоматики и электромеханики «НИИ АЭМ ТУСУР», г. Томск
ivanovnii@sibmail.com, rulevsky@niiaem.tomsk.ru, tnn@niiaem.tomsk.ru

Аннотация

В работе приведено описание системы контроля и управления, предназначенной для работы в составе литий-ионной аккумуляторной батареи косморобота.

Ключевые слова: контроль параметров, литий-ионная аккумуляторная батарея, выравнивание ячеек, косморобот.

Разработка робототехнических систем для целей исследования и освоения космоса является одним из знаковых направлений развития науки и техники. Наиболее актуальными тенденциями развития космической техники являются такие, как расширение функциональности, увеличение срока активной эксплуатации, повышение степени автономности. [1]

Как известно, аккумуляторные батареи на основе Li-ion аккумуляторов используются повсеместно. Практически все перспективные космические аппараты оснащаются литий ионными

аккумуляторными батареями (ЛИАБ). К их достоинствам можно отнести: высокие удельные характеристики, герметичность, большое количество циклов заряд/разряд (до 1000) и ряд других особенностей. [2]

Аккумуляторная батарея (АБ) состоит из аккумуляторных элементов (АЭ), которые стараются подобрать с достаточно близкими техническими параметрами при изготовлении АБ, а именно внутреннее сопротивление, токи саморазряда в режиме хранения, скорость деградации электродных материалов и т. д.

АБ на основе литий-ионных аккумуляторных элементов (ЛИАЭ) в силу особенностей электрохимических процессов, протекающих в них, имеют повышенные требования к контролю их параметров в процессе эксплуатации. Не идентичность характеристик ЛИАЭ, необходимых для обеспечения высоких эксплуатационных характеристик АБ ставит задачу либо повышения требований к технологическому процессу изготовления ЛИАЭ, что ведёт к резкому удорожанию изделий, либо введения в состав ЛИАБ модуля контроля параметров АБ и управления режимом заряда-разряда, задачей, которой является контроль напряжения на элементах АБ и выполнение процедуры балансировки в процессе эксплуатации.

При заряде/разряде все эти факторы приводят к появлению «окна», которое равно разности между напряжениями самого заряженного и самого разряженного аккумулятора (рис. 1), то есть напряжения, которые были примерно одинаковыми для всех аккумуляторов вначале, постепенно «разбегаются». При расширении этого «окна» емкость самой батареи начинает снижаться, поэтому заряд батареи необходимо будет прекратить, как только один из аккумуляторов достигнет конечного зарядного напряжения, то же самое произойдет и при разряде. В конечном итоге из-за расширения «окна» емкость самой батареи может значительно снизиться, если не предпринимать определенных мер.[3]

В настоящее время в состав аккумуляторных батарей с целью повышения их надежности и продления срока службы, вводится электронный блок со схемой контроля параметров аккумуляторов и управления режимом заряда-разряда. В силу особенностей работы литий ионных аккумуляторов наличие такого блока обязательно, так как при его отсутствии при любых нештатных ситуациях или даже при технологическом разбросе параметров отдельных аккумуляторов в батарее может привести к её перегреву и, даже выходу из строя.

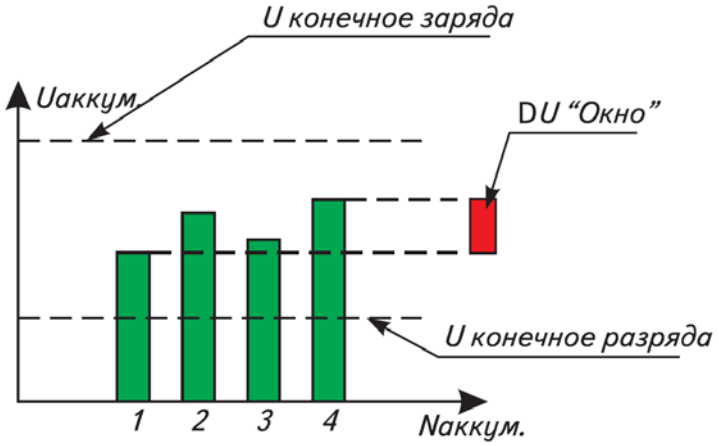


Рисунок 1 – «Окно» разбаланса, снижающее емкость

Использование такого блока обеспечивает повышение надежности и продление срока эксплуатации АБ за счет выравнивания напряжений на последовательно соединенных аккумуляторных элементах и позволяет эксплуатировать батарею с отдачей максимально возможной емкости. Данное схемотехническое решение позволяет повысить безопасность эксплуатации АБ, реализовать более эффективные методы заряда, предоставлять пользователю напрямую или через согласующее устройство, в состав которого входит АБ, информацию о текущей емкости, времени до окончания заряда или разряда, что повышает эксплуатационные характеристики аккумуляторной батареи. Модули контроля и управления могут быть построены либо на основе специализированных интегральных микросхем, что ведет к уменьшению габаритов, либо на элементной базе общего

назначения, что ведет к увеличению габаритов, но при этом позволяет расширять функциональные возможности [4].

Существует два метода выравнивания заряда на ячейках аккумуляторной батареи: “пассивный” и “активный”[5]. Принцип активного выравнивания состоит в дозаряде аккумулятора с наименьшим напряжением, принцип пассивного выравнивания состоит в разряде аккумулятора с наивысшим напряжением.

Для работы в составе батареи косморобота в НИИ АЭМ ТУСУР была разработана система контроля и управления (СКУ). В качестве базовой структуры принята структура с выравниванием разрядом, так как данный подход позволяет упростить систему и, как следствие, снизить массо-габаритные показатели и увеличить надежность. Структурная схема СКУ представлена на рис. 2.

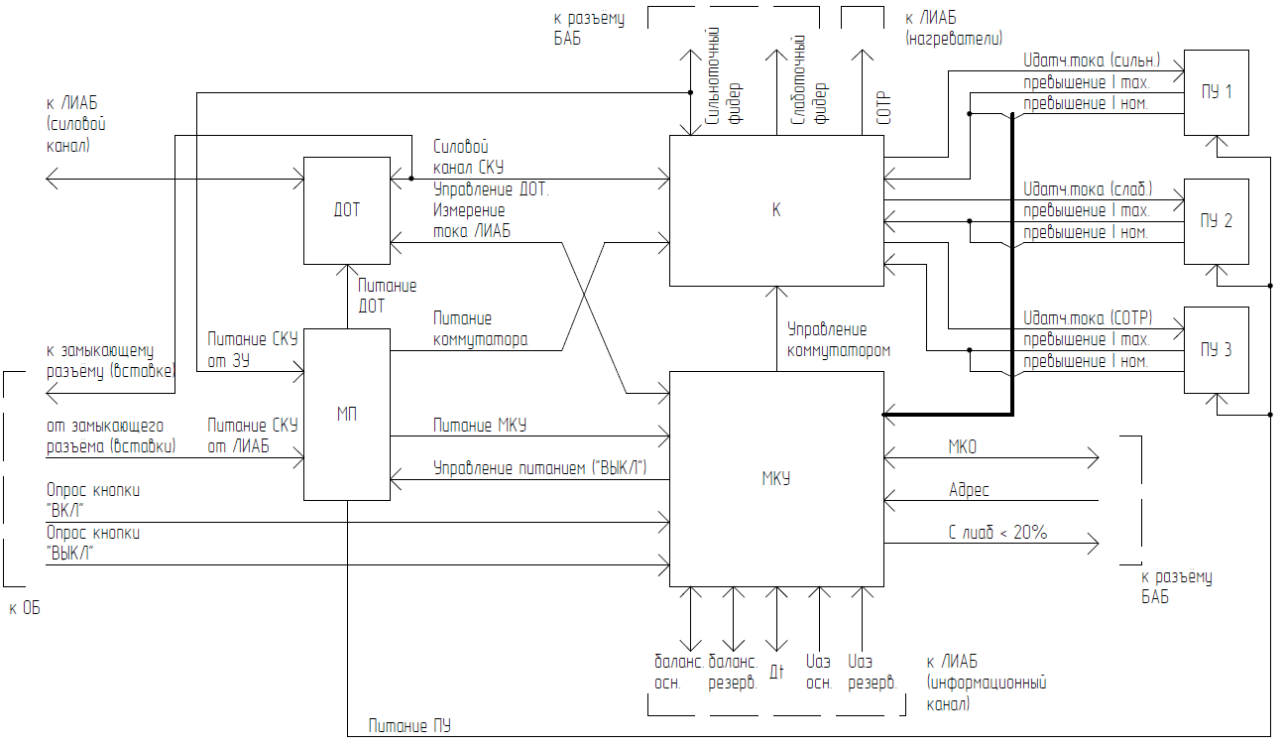


Рисунок 2 – Структурная схема СКУ

СКУ включает в себя: модуль питания (МП), датчик общего тока (ДОТ), пороговые устройства (ПУ), коммутатор (К) и модуль контроля и управления (МКУ). Работает СКУ следующим образом: при подаче питания запускается внутренний источник питания, который вырабатывает напряжения необходимые для работы всех остальных модулей. Питание на СКУ подается либо от ЛИАБ, установкой специальной перемычки, либо подключением к зарядному устройству через сильноточный фидер (при разряженном аккумуляторе). После подачи питания происходит загрузка ПО МКУ и самотестирование. В случае положительного результата теста, МКУ выдает сигнал коммутатору на включение системы обеспечения теплового режима (СОТР). При нажатии кнопки «ВКЛ.» МКУ выдает сигнал коммутатору на включения слаботочного фидера. По слаботочному фидеру осуществляется питание ЭВМ робота. При нажатии кнопки «ВЫКЛ.» питание со слаботочного фидера соответственно снимается.

Связь МКУ с ЭВМ робота осуществляется по мультиплексному каналу обмена (МКО), через разъём блока аккумуляторной батареи (БАБ). Команды на включение сильноточного фидера, балансировку и режиме работы поступают в МКУ от ЭВМ робота по МКО. МКУ осуществляет измерение температуры и напряжения на аккумуляторных элементах и батарее, балансировку напряжений на аккумуляторах батареи и передает эти данные в ЭВМ робота. Пороговые устройства осуществляют измерение тока потребляемого по каждому фидеру и функцию защиты от короткого замыкания и превышения тока. Защита от короткого замыкания реализована аппаратно напрямую,

защита от превышения реализована программно-аппаратно с использованием МКУ. Датчик общего тока предназначен для измерения суммарного тока потребляемого по всем фидерам от ЛИАБ.

По сильточному фидеру осуществляется питание приводов робота, а также заряд ЛИАБ. Коммутация сильноточного фидера осуществляется по команде от ЭВМ робота. При разряде аккумулятора до 20% емкости МКУ формирует сигнал предупреждения для ЭВМ робота. При снижении величины напряжения на АБ ниже критической МКУ отключает фидеры, а потом и сам отключается. Включение при разряженном аккумуляторе возможно только от зарядного устройства.

Модуль питания (МП) представляет собой конструктивно законченное устройство, входящее в состав СКУ и работающее не зависимо от исправности остальных модулей СКУ. Основное назначение модуля питания - формирования ряда питающих напряжений (U1…Un), для работы всех модулей СКУ. Модуль питания подключается к ЛИАБ и обеспечивает функционирование при наличии напряжения. Структурная схема модуля питания представлена на рис.3.

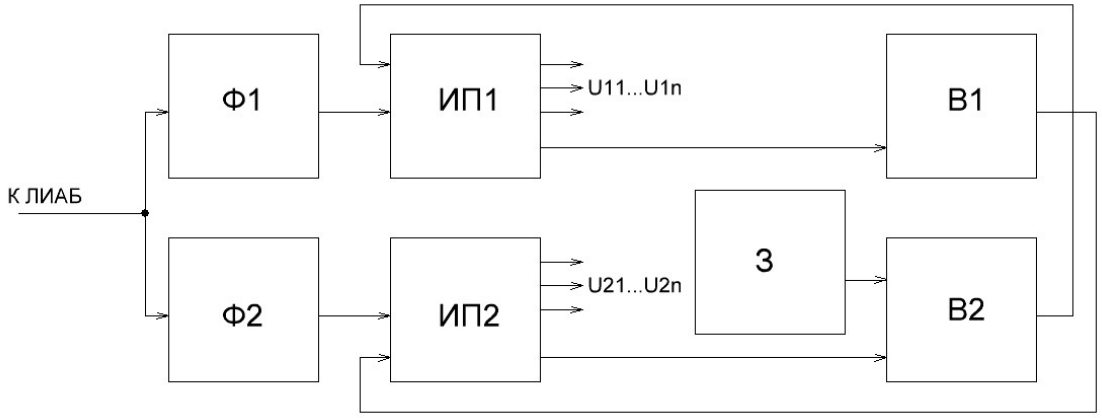


Рисунок 3 – Структурная схема МП

Модуль питания состоит из двух фильтров электромагнитных помех (Ф, Ф2), двух источников питания (ИП1, ИП2), двух схем выбора (В1, В2) и схемы включения (З). Работает модуль питания следующим образом: при подаче напряжения на один или сразу оба фидера напряжения суммируются при помощи диодов и через фильтры подаются одновременно на оба источника питания. ИП1 является основным, ИП2 является резервным.

Источники питания выдают ряд напряжений (U11…U1n, U21…U2n), которые затем подаются на остальные модули СКУ и обеспечивают их работу.

Фильтры (Ф1, Ф2) являются двунаправленными CLC-фильтрами, которые служат, как для защиты источников питания от помех, передающихся по фидеру, так и для защиты фидера от помех, генерируемых модулем питания.

Для увеличения надежности источники питания дублированы, а для увеличения ресурса модуля питания применена схема выбора, которая отключает второй источник, когда один из источников работает.

Выбор рабочего источника осуществляется при помощи двух схем выбора (В1, В2). На вход схемы выбора с соответствующего источника подается напряжение, пропорциональное выходному напряжению. Эти напряжения берутся с дополнительных информационных обмоток силовых трансформаторов, выпрямляются, сглаживаются и подаются на измерительные устройства. Если выходное напряжение работающего в данный момент источника питания выше минимально допустимого значения, то на выходе соответствующей схемы выбора присутствует сигнал «0», запрещающий работу второго источника питания.

Если напряжение на входе измерительного устройства опустится ниже допустимого предела, что произойдет при отказе ИП, или пропадании напряжения одного из фидеров, то на выходе появится сигнал «1», разрешающий работу второго, предположительно исправного источника питания.

В момент включения питания выходные напряжения обоих источников питания равны 0, следовательно, устройство выбора окажется в состоянии, разрешающем одновременную работу двух источников питания, что недопустимо. Для исключения такого состояния, служит схема запуска,

которая вырабатывает сигнал, принудительно устанавливающий в момент включения схему выбора 1 в состояние, запрещающее работу второго источника питания, таким образом при включении запустится только один источник питания.

Модуль контроля и управления является составным устройством и содержит: резервированный модуль управления (МУ), резервированный модуль измерения температуры (МИТ) и два резервированных модуля измерения напряжения (МИН). Структурная схема модуля представлена на рис. 4.

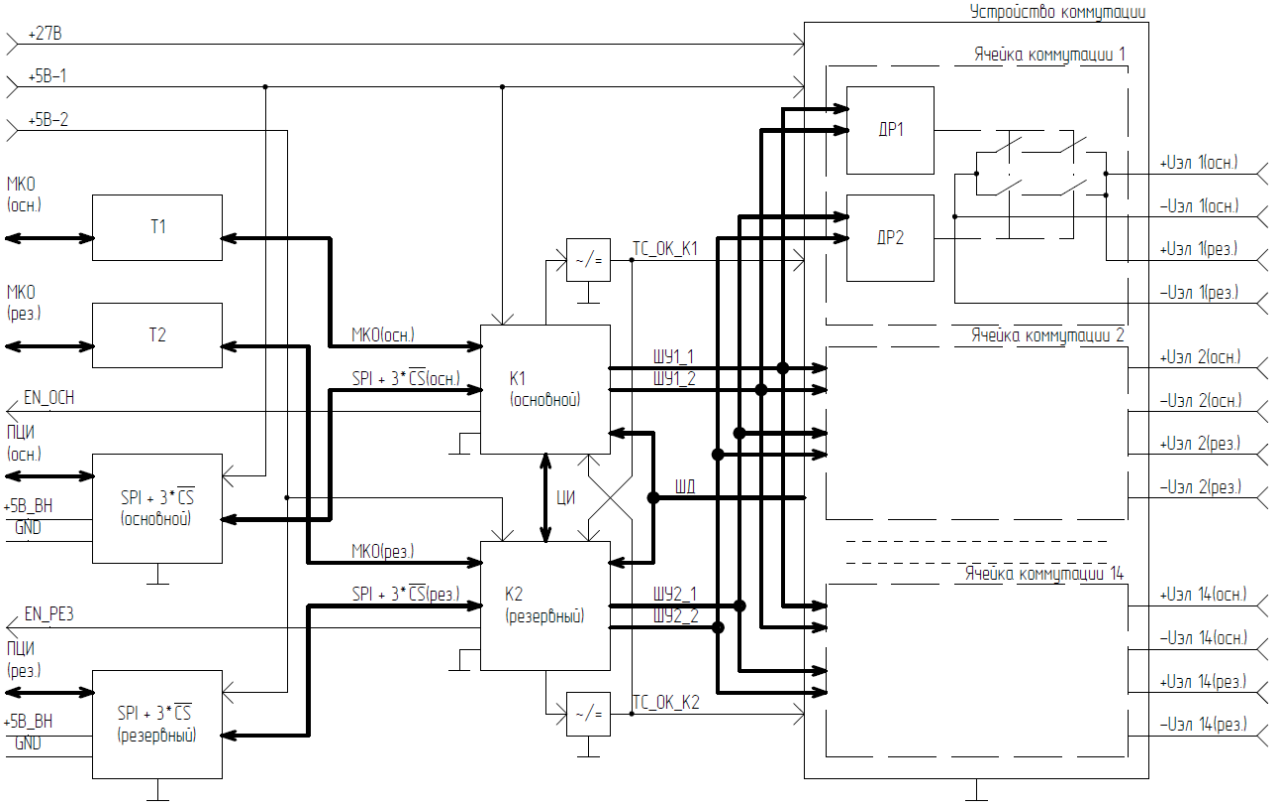


Рисунок 4 – Схема структурная МКУ

МУ является узлом выполняющим основные логические функции СКУ как-то:

– информационно-логическое взаимодействие с ЭВМ робота;

– контроль параметров ЛИАБ на их соответствие допустимым диапазонам;

– управление модулями, входящими в состав СКУ с целью обеспечения безаварийной эксплуатации ЛИАБ.

МУ, состоит из:

– двух трансформаторов Т1 и Т2 посредством которых МУ сопрягается с резервированным мультиплексорным каналом обмена (МКО) для информационно-логического взаимодействия с ЭВМ робота;

– двух устройств согласования интерфейса SPI посредством которых МУ сопрягается с устройствами гальваноразвязки последовательного интерфейса модулей МИТ и МИН для информационно-логическое взаимодействие с ними;

– двух шинных формирователей посредством которых МУ сопрягается с резервированным последовательным синхронным интерфейсом и осуществляет управление измерительными модулями;

– устройства коммутации предназначенного для управления балансировочными резисторами входящих в состав ЛИАБ и осуществления балансировки последней;

– двух контроллеров, основного и резервного, реализующих управление измерительными модулями, осуществляющих сбор данных измерений параметров ЛИАБ и логический функционал СКУ в целом.

В СКУ осуществляется выравнивание при помощи попеременного подключения и отключения к элементам ЛИАБ специальных разрядных резисторов, входящих в состав ЛИАБ. Устройство коммутации (УК) содержит 14 коммутационные ячейки состоящих из драйверов реле и четырёх реле включенных попарно последовательно двумя параллельными цепями.

Устройство выравнивания состоит из драйвера и коммутатора. По сигналу с центрального процессора драйвер управляет коммутатором. Коммутатор подключает или отключает разрядные резисторы, входящие в состав ЛИАБ, в соответствии с алгоритмом выравнивания, определяемым центральным процессором.

Модуль измерения температуры (МИТ) содержит два идентичных канала, состоящих из:

– AC/DC-преобразователя формирующего из напряжения питания переменного тока 27В/50кГц постоянное напряжение 5В для питания канала;

– устройства гальванической развязки исключающих электрическую связь и обеспечивающих передачу логических сигналов последовательного синхронного интерфейса между АЦП канала и МУ;

– мультиплексора, позволяющего выбрать для измерения сопротивления один датчик температуры единовременно;

– источника тока опроса формирующего ток опроса выбранного датчика температуры. Также, ток опроса протекает через находящийся в нём прецизионный резистор, посредством чего формируется опорное напряжение для АЦП и таким образом обеспечивается пропорциональность опорного и измеряемого напряжений вне зависимости от стабильности тока опроса;

– АЦП осуществляющего управление мультиплексором (по командам от МУ) и измерение сопротивления датчиков температуры и их выдачу в МУ по запросу последнего.

Модуль измерения напряжения (МИН), содержит два идентичных канала, состоящих из:

– AC/DC-преобразователя формирующего из напряжения питания переменного тока 27В/50кГц постоянное напряжение 5В для питания канала;

– устройства гальванической развязки исключающих электрическую связь и обеспечивающих передачу логических сигналов последовательного синхронного интерфейса между АЦП канала и МУ;

– мультиплексора, позволяющего выбрать для измерения напряжения одного ЛИА или ЛИАБ единовременно;

– нормирующего усилителя, посредством которого осуществляется согласование измеряемого напряжения с входным диапазоном напряжения АЦП и обеспечивающего выполнение требования по входному сопротивлению канала измерения напряжения;

– АЦП осуществляющего управление мультиплексором (по командам от МУ) и измерение напряжения и их выдачу в МУ по запросу последнего.

Каждый канал измерения напряжения МИН имеет восемь каналов измерения с входным напряжением в диапазоне от минус 1.5 В до 4.5 В и один канал с входным напряжением в диапазоне от 0 В до 70 В. Таким образом входящие в состав СКУ два МИН обеспечивают измерение напряжений на 14 АЭ и одно АБ. Так как каждый МИН содержит два независимых канала измерения, то результатом их работы являются два независимых массива напряжения ЛИА и ЛИАБ.

Модульный принцип построения сложился еще на ранних этапах развития космической техники, явившись естественным следствием целесообразности, а в ряде случаев и необходимости, выделения составных частей изделия, разнородных с конструктивной, технологической и функциональной точек зрения. [1] Исходя из этого принципа, ЛИАБ и СКУ представляют собой законченный модуль, называемый блок аккумуляторной батареи (БАБ). Все функции по обслуживанию и измерению параметров ЛИАБ осуществляются в этом модуле. Такой подход снижает вычислительную нагрузку на ЭВМ робота, упрощает конструкцию, упрощает бортовую кабельную сеть, позволяет наращивать энерговооружённость путём увеличения количества ЛИАБ с минимальными затратами. СКУ рассчитан на работу с аккумуляторной батареей емкость 75 Ач, напряжением 42-58.8 В, средним током разряда 20А и максимальным током разряда 55А. однако примененные схемотехнические решения и принципы построения, позволяют достаточно легко масштабировать СКУ для работы с батареей с другими параметрами.

1. Белоножко П. П. Космическая роботехника. Современное состояние, перспективные задачи, тенденции развития. Аналитический обзор. // Наука и образование. МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, 2016. с. 110-153..

2. Хромов А. В. Литий-ионные аккумуляторные батареи низкоорбитальных космических аппаратов // Вопросы электромеханики, т. 152. – Москва, 2016. с. 20-28.
3. Рыкованов А. Система баланса Li-ion аккумуляторных батарей // Силовая электроника №1, 2009. – Москва. с. 52-55
4. Н. Н. Цебенко, А. В. Иванов, Г. А. Ракитин, В. М. Рулевский, А. В. Федоров. Модуль контроля и управления для литий-ионных аккумуляторных батарей.// Актуальные вопросы проектирования автоматических космических аппаратов для фундаментальных и прикладных научных исследований (выпуск 2). – Химки, 2017. с. 484-491
5. Moore S., Schneider P. A Review of Cell Equalization Methods for Lithium Ion and Lithium Polymer Battery Systems // SAE Technical Paper 2001-01-0959, 2001.

K.A. Volnyakov

INFLUENCE OF LUBRICANTS IN ZONE OF CONTACT OF SURFACES

Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics, Saint-Petersburg
rjcnz_07@mail.ru

Abstract

This article presents thermal model of robotic systems objects with incomplete contact square, here analyzed the impact of lubricants on thermal conductivity and carried out experiments which confirming the adequacy of the model.

Key words: contact thermal conductivity, rolling bearings, gears, lubricants.

К.А. Волняков

ВЛИЯНИЕ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ В ЗОНЕ КОНТАКТА ПОВЕРХНОСТЕЙ

ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург
rjcnz_07@mail.ru

Аннотация

В данной статье представлена тепловая модель объектов робототехнических систем с неполной площадью контакта, проанализировано влияние смазочного материала в зоне контакта на теплопроводность и проведены эксперименты, подтверждающие адекватность приведённой модели.

Ключевые слова: контактная теплопроводность, подшипники качения, зубчатые передачи, смазочные материалы.

Вопрос о теплопроводности элементов с неполной площадью контакта часто оказывается решающим в тепловом анализе систем. Например, при анализе привода, применяемого в двухосной поворотной платформе для ориентирования полезной нагрузки, разработанной в ЦНИИ РТК, было выявлено, что модель без учёта контактных сопротивлений показывает результаты с неудовлетворительной даже для предварительных расчётов точностью (рисунок 1).

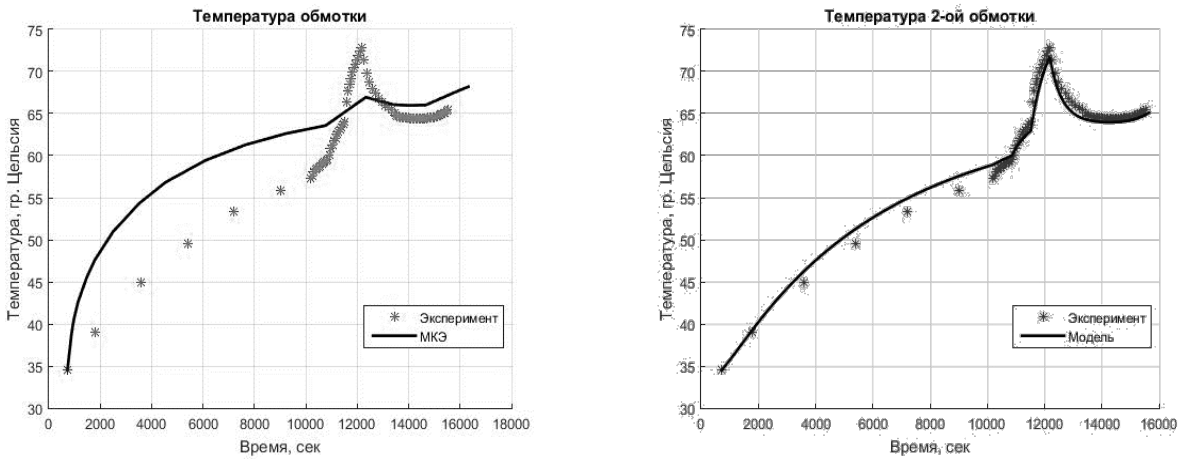


Рисунок 1 – Сравнение результатов эксперимента и моделирования (слева – без учёта контактных сопротивлений; справа – с учётом)

В общем случае контакт двух металлических поверхностей можно разделить на следующие участки (рисунок 2) [1]:

а) Площадь чистого контакта металлов;
б) Площадь, покрытая адгезионными или хемосорбированными слоями атомов кислорода;
в) Площадь, покрытая оксидными плёнками;
г) Номинальная площадь.

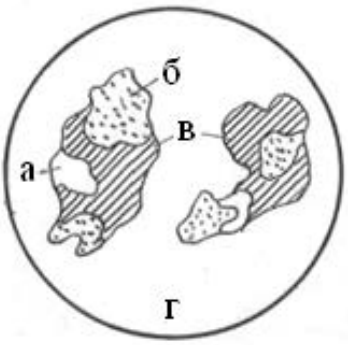


Рисунок 2 – Области контакта двух металлических поверхностей

Поверхность металлов, покрытая оксидными плёнками, обладает теплопроводностью от 5 до 40 $Вт/(м \cdot К)$ [2], что в 5-8 раз отличается от теплопроводности чистого металла. Например, теплопроводность алюминия: $\sim 237\ Вт/(м \cdot К)$; оксида алюминия: $\sim 40\ Вт/(м \cdot К)$ [2].

Через поверхности, покрытые адгезионными и хемосорбированными слоями кислорода, тепловой поток может протекать почти также, как и через чистый контакт металлов, поэтому эти участки будут рассматриваться как участки с теплопроводностью металлов.

В области контакта чистых металлов имеет место так называемый эффект стягивания. Областью стягивания называется область контакта, где линии теплового потока искривляются, стягиваясь к пятну контакта (рисунок 3).

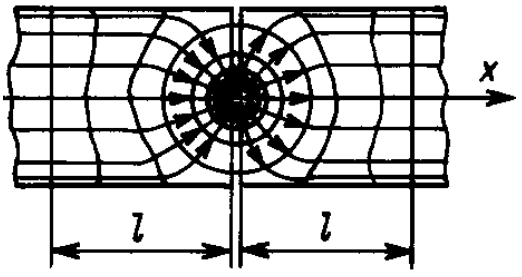


Рисунок 3 – Область стягивания

В областях стягивания поперечное сечение проводника используется не полностью для прохождения теплового потока, что вызывает дополнительное сопротивление контакта.

В робототехнике используются движущиеся элементы, неотъемлемой частью которых являются смазочные материалы. Таким образом, необходимо выявить и количественно определить влияние смазочных материалов на сопротивление контакта, так как в ряде случаев определение сопротивления контакта смазанных поверхностей необходимо для расчёта системы обеспечения теплового режима. Дополнительный интерес представляет разность температур внешнего и внутреннего колец подшипника, так как неравномерное тепловое расширения может привести к нарушению посадки.

Стенд для исследования теплопроводности подшипника качения представлен на рисунке 4. Нагревательный элемент (3) расположен на внешнем кольце подшипника (1). Тепловой поток будет частично уходить через ЭВТИ (4) и частично через изолирующую подложку (5) на корпус вакуумной камеры. Остальная часть потока пойдёт через подшипник качения (1) на установочный вал (2), а затем через скобы (6) на дно вакуумной камеры. Радиальное усилие, действующее на внутреннее кольцо подшипника (F) задаётся затяжкой болтов (7).

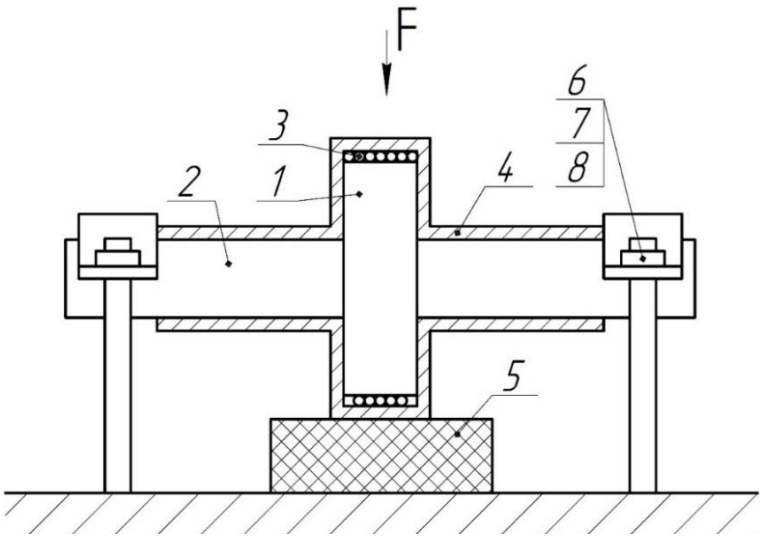


Рисунок 4 – Стенд для измерения теплового сопротивления между внешним и внутренним кольцами подшипника качения.
1 – Исследуемый подшипник; 2 – Установочный вал;
3 – Нагревательный элемент; 4 – ЭВТИ; 5 – изолирующая подложка;
6 – Скоба; 7 – Болт; 8 – Гайка

Параметры исследуемого образца:

- Подшипник – 1000904;
- Статическая грузоподъёмность: $C_0 = 3040$ Н.

При воздействии радиальной силы на одно из колец подшипника нагрузка распределяется между 3-мя–7-ю шариками в зависимости от общего количества шариков в подшипнике. Схема распределения сил между телами качения представлена на рисунке 5.

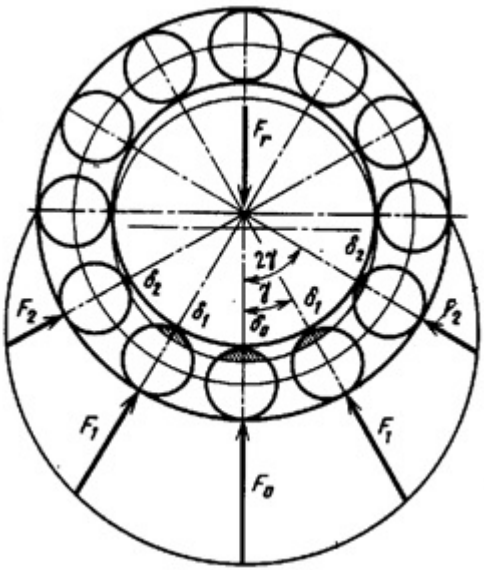


Рисунок 5 – Схема распределения радиальной нагрузки между телами качения подшипника

Для данного подшипника количество шариков, воспринимающих нагрузку равно 5. Таким образом, эквивалентная тепловая схема стенда имеет вид, представленный на рисунке 6.

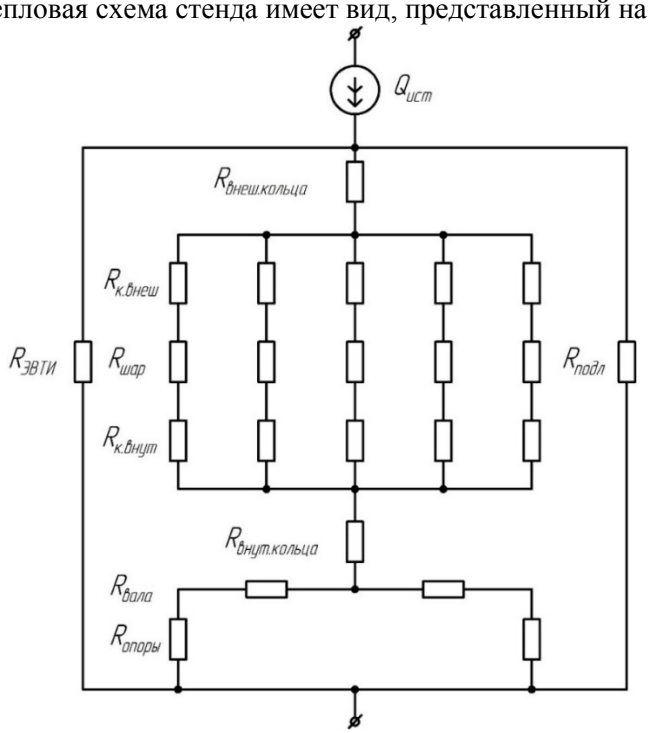


Рисунок 6 – Эквивалентная тепловая схема стенда

На данной схеме:

$Q_{\text{ист}}$ – суммарная тепловая мощность, подводимая к внешнему кольцу подшипника;

$R_{\text{ЭВТИ}}$ – тепловое сопротивление ЭВТИ;

$R_{\text{подл}}$ – тепловое сопротивление подложки;

$R_{\text{внеш.кольца}}$ – тепловое сопротивление внешнего кольца подшипника;

$R_{\text{к.внеш}}$ – тепловое сопротивление контакта шарика и внешнего кольца подшипника;

$R_{\text{шар}}$ – тепловое сопротивление шарика подшипника;

$R_{\text{к.внут}}$ – тепловое сопротивление контакта шарика и внутреннего кольца подшипника;

$R_{\text{внут.кольца}}$ – тепловое сопротивление внутреннего кольца подшипника;

$R_{\text{вала}}$ – тепловое сопротивление установочного вала;

$R_{\text{опоры}}$ – суммарное тепловое сопротивление скобы, гайки и винта.

В общем случае выделяют следующие площади контакта двух шероховатых поверхностей (рис. 7).

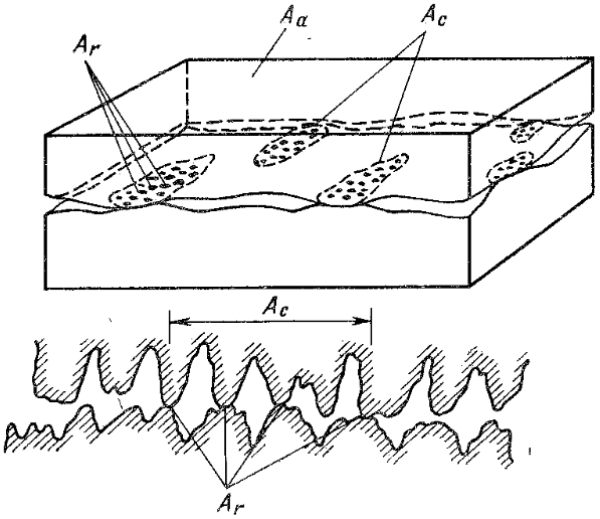


Рисунок 7 – Схема контакта шероховатых поверхностей.

A_a – номинальная площадь контакта;

A_c – контурная площадь контакта;

A_r – фактическая площадь контакта

Контурная площадь контакта (КПК) – площадь, на которой осуществляется дискретный контакт волн.

Фактическая площадь контакта (ФПК) – площадь, на которой осуществляется контакт микронеровностей, образующих шероховатость поверхностей.

Для металлов КПК обычно составляет 5-10% от номинальной, однако если номинальная площадь контакта невелика и волнистостью можно пренебречь, то можно считать КПК равной номинальной. ФПК обычно мала и составляет 0,01-0,1% от номинальной, но в случае малой номинальной площади доля ФПК принимает гораздо большие значения [3].

Номинальную площадь контакта выразим из формулы Герца для контактного напряжения [4]:

$$\sigma_{\text{Н}} = m \cdot \sqrt[3]{\frac{F_0 \cdot E^2}{r_{\text{пр}}^2}}, \qquad (1)$$

где

m – коэффициент, зависящий от соотношения A/B:

$$\frac{A}{B} = \frac{1/R_{\text{ш}} + 1/R_{\text{ж}}}{1/R_{\text{ш}} + 1/R_{\text{к}}}$$

$R_{\text{ш}}$ – радиус шарика;

$R_{\text{ж}}$ – радиус желоба;

$R_{\text{к}}$ – радиус кольца.

Радиусы желобов дорожек качения внутреннего и внешнего колец соответственно равны:

$$R_{\text{ж.внутр}} = 0{,}52 \cdot 2R_{\text{ш}}$$

$$R_{\text{ж.внешн}} = 0{,}54 \cdot 2R_{\text{ш}}$$

Если в нормальном сечении имеет место внутренний контакт двух тел, то радиус охватывающей поверхности принимают отрицательным.

Зависимость коэффициента m от A/B представлена на рисунке 8. Данная зависимость может быть приближённо аппроксимирована выражением [4]:

$$m = 10^{-0{,}396 \cdot \lg(A/B) - 0{,}42}$$

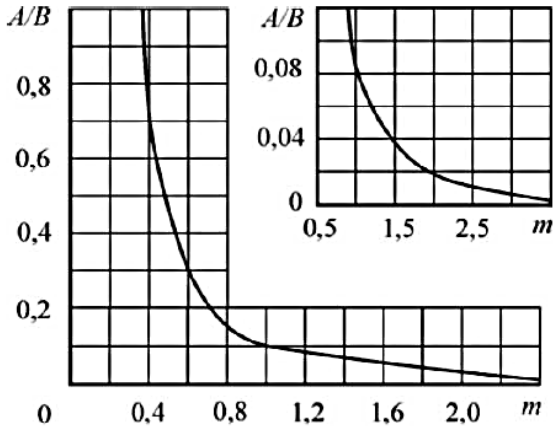


Рисунок 8 – Зависимость коэффициент m от соотношения A/B

Исходя из схемы, представленной на рисунке 5 можно выразить силы F_0, F_1 и F_2 [4]:

$$F_i = \frac{F_r}{\left(1+2\cdot cos^{5/2}(i\cdot\gamma)\right)}. \quad (2)$$

z – общее количество шариков в подшипнике.

Пользуясь приближённым подобием подшипников качения и выразив радиусы колец через диаметр тела качения, можно получить приближённую формулу для контактных напряжений в подшипниках:

$$\sigma_{\text{Н}} \approx 1800 \cdot \sqrt[3]{\frac{F_r}{z\cdot D_{\text{ш}}^2}} \quad (3)$$

Номинальная площадь контакта:

$$A_{\text{н}} = \frac{F_i}{\sigma_{\text{Н}}} = \frac{1}{m} \cdot \sqrt[3]{\frac{F_0^2\cdot r_{\text{пр}}^2}{E^2}} \quad (4)$$

Или по упрощённой формуле:

$$A_{\text{н}} \approx F_i/\left(1800 \cdot \sqrt[3]{\frac{F_r}{z\cdot D_{\text{ш}}^2}}\right) \quad (5)$$

Как указывалось ранее, радиальная нагрузка на подшипник задаётся затяжкой болтового соединения. Осевое усилие болта рассчитывается по формуле [5]:

$$F = \frac{M_{\text{зат}}}{0{,}5\cdot d_{\text{ср}}\cdot \text{tg}(\psi+\rho)+f_b\cdot\left(D^3-d_c^3\right)/\left(3\cdot\left(D^2-d_c^2\right)\right)}, \quad (6)$$

где

$M_{\text{зат}}$ – момент затяжки;

$d_{\text{ср}}$ – средний диаметр резьбы;

$\psi = arctg\left(\frac{p}{\pi\cdot d_{\text{ср}}}\right)$ – угол подъема резьбы;

p – шаг резьбы;

$\rho = arctg(f_p)$ – угол трения резьбовой пары

f_p – коэффициент трения в резьбе;

f_b – коэффициент трения в опорной поверхности болта/гайки;

D – размер «под ключ»;

d_{c} – диаметр сверления под болт.

Рекомендованное значение f_b и f_p для крепёжных элементов с защитными покрытиями составляет 0,12 [6].

Контроль момента затяжки осуществлялся цифровым динамометром. Точность определения осевого усилия таким методом составляет 15% [6].

Наибольшие допускаемые контактные напряжения для подшипниковых сталей в условиях начального касания в точке принимают равным до $[\sigma_{\text{Н}}] = 5000$ МПа [4]. Соответственно, максимальная номинальная площадь равна:

$$A_{\text{н}} = \frac{C_0}{[\sigma_{\text{Н}}]} = \frac{3040\ \text{Н}}{5000\ \text{МПа}} = 0{,}608\ \text{мм}^2$$

Номинальная площадь весьма мала, поэтому принимаем КПК равной номинальной: $A_{\text{к}} = A_{\text{н}}$. Поверхности тела качения и дорожки качения имеют одинаковую шероховатость, равную $Ra_1 = Ra_2 = 0{,}32$ мкм [4]. Для расчёта фактического давления воспользуемся приближённой формулой для двух шероховатых поверхностей [3]:

$$p_r = 0{,}61 \cdot \left(\frac{Ra \cdot E'}{r}\right)^{0{,}43} \cdot p_c^{0{,}14}, \tag{7}$$

где

p_c – контурное давление;

$Ra = Ra_1 + Ra_2 = 0{,}32 + 0{,}32 = 0{,}64$ мкм;

$E' = \frac{E_1}{1-\nu_1^2} + \frac{E_2}{1-\nu_2^2} = 2{,}11 \cdot 10^5$ МПа – приведённый модуль упругости

$r = \frac{r_1 \cdot r_2}{r_1 + r_2}$ – приведённый радиус кривизны поверхностей.

Таблица приведённых радиусов кривизны для различных видов обработки стальных поверхностей приведена в работе [3] на странице 22. Обработка тела качения и дорожек качения подшипников заканчивается шлифовкой, а в случае повышенной точности – доводкой. Для круглого шлифования 9-ого класса: $r_1 = 20$ мкм; для внутреннего шлифования 9-ого класса: $r_2 = 13$ мкм. Тогда приведённый радиус кривизны:

$$r = \frac{r_1 \cdot r_2}{r_1 + r_2} = \frac{20 \cdot 13}{20 + 13} = 7{,}879\ \text{мкм}.$$

Предполагается, что смазка будет заполнять свободное пространство между микронеровностями двух шероховатых поверхностей как показано на рисунке 9.

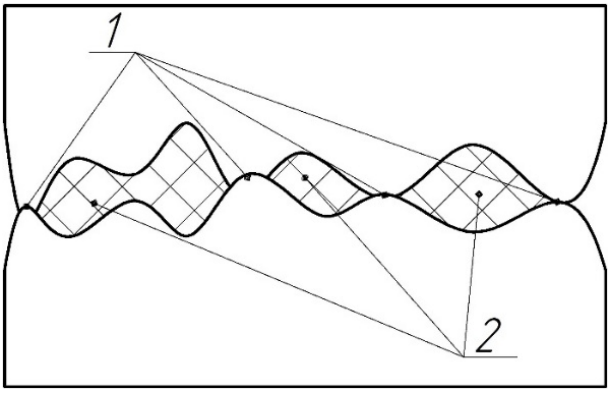


Рисунок 9 – Контакт двух шероховатых смазанных поверхностей.
1 – Зона контакта металлов;
2 – Зона, заполненная смазкой

В таком случае, теплопроводность контакта:

$$\lambda_{\text{к}} = \frac{\lambda_{\text{м}} \cdot S_{\text{м}}}{h} + \frac{\lambda_{\text{см}} \cdot S_{\text{см}}}{h}, \tag{8}$$

где

$\lambda_м$ – теплопроводность металла;

$S_м$ – площадь контакта металлов;

$\lambda_{см}$ – теплопроводность смазки;

$S_{см}$ – площадь смазки;

$h = \left(1 - 3{,}3\sqrt[3]{p_c/p_r}\right) \cdot 2{,}5 \cdot (Ra_1 + Ra_2)$ – толщина зоны контакта [3].

Результаты вычислений контурной площади, фактической площади, площади смазки и толщины зона контакта представлены в таблице 1. Радиальное усилие установлено равным 2930 Н. Эти параметры используются для синтеза теоретической модели.

Таблица 1. Результаты расчёта параметров модели

Индекс шарика	КПК, мм^2	ФПК, мм^2	Процентное отношение ФПК к КПК, %	Площадь смазки, мм^2	Толщина зоны контакта, мкм
Внутреннее кольцо					
0	0,0760	0,0385	50,7	0,0376	0,710
1	0,0660	0,0314	47,6	0,0346	0,763
2	0,0348	0,0126	36,2	0,0222	0,965
Внешнее кольцо					
0	0,1221	0,0411	33,7	0,0810	1,008
1	0,1060	0,0336	31,7	0,0724	1,043
2	0,0558	0,0134	24,0	0,0424	1,177

В системах космического назначения применяется смазка ВНИИНП «Ника». Теплопроводность этой смазки не приводится ни в одном источнике, однако известно, что основой этой смазки является перфторполиэфир. Смазки на основе перфторполиэфира по данным компании Solvay Solexis [7] имеют теплопроводность около $0{,}07$ Вт/м · К. Оценка влияния смазки на теплопроводность в зоне контакта приведена в таблице 2.

Таблица 2. Оценка влияния смазки на теплопроводность в зоне контакта

Индекс шарика	Теплопроводность чистого металлического контакта, Вт/К	Теплопроводность смазки в зоне контакта, Вт/К	Влияние смазки на теплопроводность контакта, %
Внутреннее кольцо			
0	2,277	0,0037	0,16
1	1,728	0,0032	0,18
2	0,548	0,0016	0,29
Внешнее кольцо			
0	1,713	0,0056	0,33
1	1,353	0,0049	0,36
2	0,478	0,0025	0,53

По данным таблицы 2 можно сделать вывод, что смазка практически не влияет на теплопередачу в зоне контакта. Данный факт был проверен и подтверждён экспериментально. На рисунке 10 представлена верификация модели для чистого металлического контакта при радиальной нагрузке равной 2930 Н. В ходе экспериментов задавалась определённая мощность теплового потока и отслеживалось изменение температуры внешнего кольца подшипника.

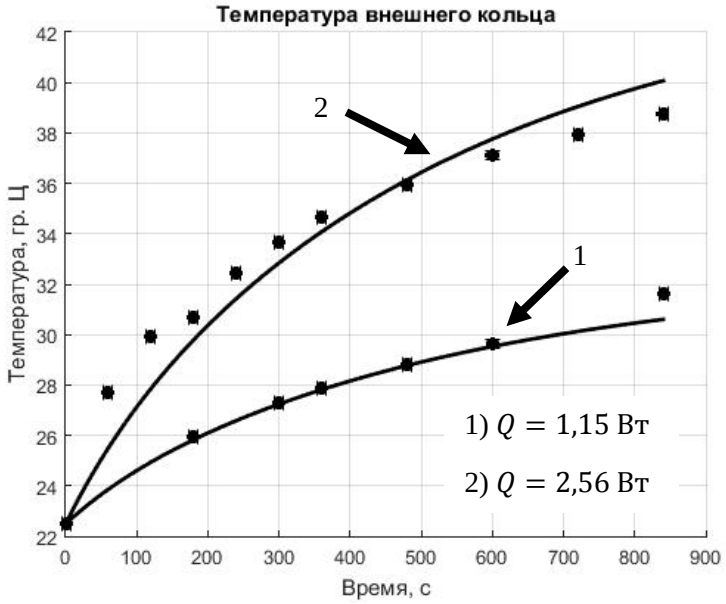


Рисунок 10 – Верификация модели

В таблице 3 представлены значения разности температур внешнего и внутреннего колец подшипника, полученные в установившемся режиме. Оценка расхождения результатов показывает, что данная модель даёт удовлетворительные результаты для предварительных расчётов.

Таблица 3. Разность температур внутреннего и внешнего колец подшипника и оценка адекватности модели

Тепловая мощность, Вт	Эксперимент, °С	Модель, °С	Относительное расхождение, %
Без смазки			
1,11	2,68	3,77	40,7
1,84	7,37	6,55	11,2
3,28	9,80	11,12	13,5
Со смазкой			
2,56	9,73	9,11	6,3
4,10	14,90	13,80	7,4
6,59	21,39	23,48	9,8

Однако пренебрегать теплопроводностью смазочного материала можно только в случае, когда ФПК составляет значительную часть от номинальной. В случае же, когда ФПК весьма мала относительно номинальной площади (менее 1-10% в зависимости от теплопроводности смазки), необходимо учитывать смазочный материал по модели эквивалентной теплопроводности (рисунок 9, формула 8).

На рисунке 11 представлено сравнение результатов моделирования и эксперимента, в котором исследовалась теплопроводность контакта стального кольца и алюминиевой пластины. На кольцо подавалась тепловая мощность 4,36 Вт, сила сжатия – 520 Н. Алюминиевая пластина установлена на термостабилизированную поверхность.

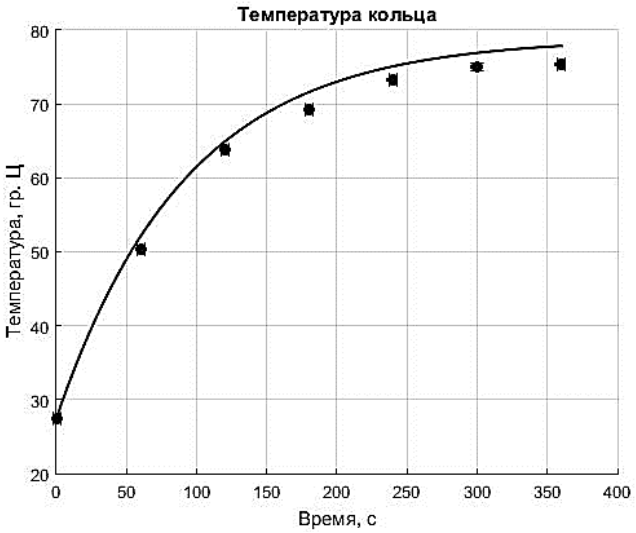


Рисунок 11 – Результаты исследования теплопроводности
без смазочного материала при малой ФПК

Для более яркого проявления эффекта была использована смазка КПТ-8, теплопроводность которой в десять раз больше, чем у смазки ВНИИНП «Ника». Сравнение результатов моделирования и эксперимента со смазочным материалом представлено на рисунке 12.

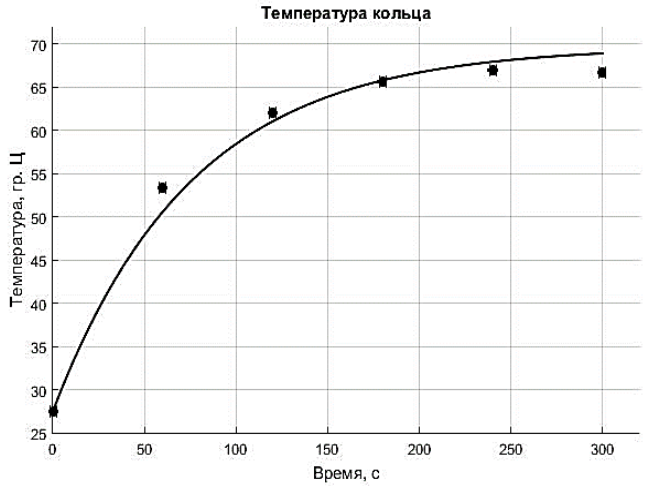


Рисунок 12 – Результаты исследования теплопроводности
со смазочным материалом при малой ФПК

Оба эксперимента проводились в одинаковых условиях. Из закона Фурье известно, разность температур имеет обратную зависимость от теплопроводности. Так как температура алюминиевой пластины стабилизирована, то изменение теплопроводности можно отследить по температуре стального кольца.

Сравнение графиков показывает, что контакт со смазкой имеет бóльшую теплопроводность, так как температура кольца ниже на величину около 10°С, чем температура при нагреве без смазки. В таблице 4 представлена оценка исследуемого контакта.

Таблица 4. Параметры контакта стального кольца и алюминиевой пластины с учётом смазки КПТ-8

Номинальная площадь, мм^2	0,0846
ФПК, мм^2	0,0065
Процентное отношение ФПК к номинальной площади, %	7,7
Теплопроводность металлического контакта, Вт/К	0,0614
Теплопроводность смазки в зоне контакта, Вт/К	0,0184
Влияние смазки на теплопроводность контакта, %	29,96

1. «Электрические и электронные аппараты». Учебник для вузов. Под ред. Ю. К. Розанова. 2-е изд., испр. и доп. М.: Информэлектро, 2001.
2. Ю. Е. Шелудяк, Л. Я. Кашпоров, Л. А. Малинин, В.Н. Цалков. «Теплофизические свойства компонентов горючих систем». Справочник. Под ред. д-ра техн. наук проф. Н. А. Силина. М.: 1992.
3. «Трение, изнашивание и смазка», справочник, книга 1. Под ред. д-ра техн. наук проф. И. В. Крагельского и канд. техн. наук В. В. Алисина. М.: Машиностроение, 1978.
4. Решетов Д.Н. Детали машин: Учебник для вузов. М.: Машиностроение, 1989. Стр. 347-349, стр. 142, стр. 346.
5. «Детали машин». Учебник для вузов. Под ред. В. Н. Ражикова. СПб.: Политехника, 2015.
6. Kevin H. Brown, Charles Morrow, Samuel Durbin, and Allen Baca. «Guideline for Bolted Joint Design and Analysis: Version 1.0». Sandia National Laboratories. California: 2008.
7. https://www.solvay.com/en/binaries/Galden-PFPE-Heat-Transfer-Fluids_EN-220543.pdf

КОММЕРЦИАЛИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЙ РОБОТОТЕХНИКИ / COMMERCIALIZATION OF ROBOTICS TECHNOLOGIES

A.S.Yuschenko

STATE OF ART AND PERSPECTIVES OF COLLABORATIVE ROBOTICS

Bauman Moscow State Technical University
robot@bmstu.ru

Abstract

Evolution of robotics in direction of intellectualization and relief of human work has resulted with appearance of robots capable to autonomous behavior and equipped with multimodal interface allowing to control them by a human – non expert. It is necessary to ensure safety as for human-operator as for other people in the working space of the robotic system. It is a new branch in robotic determined as collaborative robotics (CR). The human-robot interface of CR has to produce an adequate perception of external world for human and makes the human's commands clear for CR. The most corresponding way to solve the problem of human-robot interface seems the linguistic variables and fuzzy logic inference both at the stage of situation analysis and the stage of behavior planning and decision making. Application of «natural» for human relations of space and of time makes the human-robot dialogue more similar to dialogue between human-operator and human-assistant.

Key words: Collaborative robots, human-operator, linguistic variables, fuzzy logic inference, robotic systems, speech dialogue, multimodal interface.

А.С. Ющенко

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ КОЛЛАБОРАТИВНОЙ РОБОТОТЕХНИКИ

МГТУ им. Н.Э.Баумана, Москва
robot@bmstu.ru

Введение

Термин «коллаборативные роботы» был введен несколько лет тому назад для обозначения класса манипуляционных роботов, предназначенных для совместной и безопасной производственной работы совместно с человеком в общей рабочей зоне, в том числе, на конвейере. Однако сразу выяснилось, что область задач, в которых роботы должны работать совместно с человеком, значительно шире. По существу, речь идет о социально-технической проблеме роботизации обширной сферы практической деятельности человека. Учитывая значительное количество научных работ и реальных проектов, так или иначе связанных с этой проблемой, возникла необходимость сделать некоторые обобщения, определить, что же сегодня мы понимаем под коллаборативной робототехнической системой (КРТС) и сформулировать ближайшие перспективы этого направления.

На данный момент можно выделить следующие классы КРТС:

а) Манипуляционные роботы-ассистенты, функционирующие совместно с человеком в той же рабочей зоне и оказывающие ему помощь при выполнении операций (технологических, медицинских и др.).

б) Мобильные роботы-партнеры, функционирующие под контролем человека в рабочей зоне, в которой находятся, помимо пользователя, другие люди и технические объекты, в том числе, мобильные. К этому классу относятся также роботы, сопровождающие человека с ограниченными физическими возможностями, роботы-охранники.

в) Обобщением предыдущего класса может служить робототехническая система, включающая группу мобильных роботов-партнеров, совместно выполняющих определенное задание под контролем человека. Это может быть мониторинг внешней среды, спасательные работы, задачи военного характера.

г) Современные информационно-сенсорные системы позволяют человеку «погружаться» в виртуальную реальность, как бы присутствуя на рабочей сцене удаленного робота, что позволяет использовать условный термин «роботы-авотары».

Можно определить общие признаки, при которых робот, или робототехнический комплекс может быть отнесен к коллаборативной робототехнике. Прежде всего, это робототехническая система, обладающая элементами искусственного интеллекта, способная к автономному функционированию в недетерминированной внешней среде в соответствии с указаниями человека-оператора. Таким образом, это уже не система управления, предполагающая наличие субъекта и объекта управления, не система “master-slave”, а система, в которой человек становится как бы ведущим партнером, взаимодействуя с партнером-роботом. Это обстоятельство меняет сам характер системы, язык и способы взаимодействия, методы математического описания и проектирования системы. Вместе с тем, предполагается и предъявление новых требований к КРТС, отличных от требований к промышленной робототехнике.

Основным из этих требований является физическая безопасность для человека - как ведущего партнера, так и любого другого человека, случайно оказавшегося в зоне работы технической системы. Отметим, что это требование в КРТС удовлетворяется не только за счет интеллектуализированной системы управления, но и за счет специальной конструкции механизмов. Во-вторых – это информационная безопасность, не позволяющая «перехватить» управление несанкционированному пользователю. В-третьих, уже упомянутая относительная автономность коллаборативных роботов (КР), позволяющая человеку ограничиться общими командами и указаниями, вместо того, чтобы непосредственно управлять движениями робота, как это обычно происходит сегодня при дистанционном управлении. В случае применения мобильных роботов-партнеров эта автономность предполагает наличие систем автономной навигации, способов избежать столкновения с препятствиями, как неподвижными, так и движущимися. В случае манипуляционных роботов – наличие как физической, так и программной защиты от соударений с руками и корпусом человека. Связанное со сказанным, но все же другое(четвертое) условие – это легкость, доступность управления, позволяющая работать с КРТС человеку, не владеющему специальной подготовкой. Это условие предполагает возможность голосового (речевого) управления, которое в условия неполной определенности приобретает форму речевого диалога. В свою очередь, организация речевого диалога влечет за собой проблему распознавания и, что более важно, правильного понимания указаний оператора. Ведутся исследования по возможности применения жестикуляции как при сопровождении речи, так и в качестве самостоятельного способа управления. Наконец, если говорить о ближайших перспективах, возникает задача эмоционального сопровождения речи, значительно повышающая надежность понимания команд человека. Возможна и «обратная эмоциональная связь», позволяющая оперативно оценить состояние оператора, его работоспособность, правильность принимаемых решений.

Некоторые результаты, полученные в НЦР «Робототехника» МГТУ им. Н.Э. Баумана при решении перечисленных выше задач, представлены в докладе.

Представление ситуации в системе управления коллаборативным роботом

Пространственно-семантическое представление пространства включает описание объектов рабочей сцены и пространственно-временных отношений между ними. Особенность КРТС заключается в том, что это представление создаётся с участием человека – либо заранее, либо непосредственно в процессе работы. В первом случае имеется в виду, что коллаборативный робот, обладая собственной системой навигации, решает задачи локализации и картографирования в незнакомом пространстве по указаниям оператора, используя достаточно разработанную технологию SLAM. Во втором случае эта задача решается в процессе исследования местности в диалоге с человеком-партнером. Для реализации такого диалога целесообразно использовать нечеткие отношения. Напомним, что к пространственным относятся нечеткие отношения положения и ориентации объектов, задаваемые функциями принадлежности, которые соответствуют восприятию этих отношений человеком [1]. Например, «*объект a1 далеко, впереди справа и немного выше объекта a2*». Такие отношения принято называть *экстенциональными*. Для полноты описания к таким отношениям добавляются так называемые *интенциональные* отношения, такие как *соприкасаться; быть внутри; быть на одной плоскости*, и т.д. Используя заранее сформированные в базе знаний функции принадлежности и средства наблюдения (СТЗ, лазерные дальномеры), КР самостоятельно

может описывать ситуацию в терминах естественных пространственных отношений и сообщать об этом оператору в лингвистической форме. Эти же отношения могут использоваться оператором при формировании заданий роботу в процессе диалога. Заметим, что из совокупности элементарных пространственных отношений, используя формальные логические правила коньюнкции и дизьюнкции, можно получить практически любые отношения, встречающиеся на практике.

Текущая ситуация, включающая M объектов, включая робот или внешнего наблюдателя, описывается системой бинарных фреймов (<объект m>, <отношение>, <объект n>), m, n=1,2,…,M. Если заранее установлены нечеткие бинарные отношения между всеми объектами, которые могут наблюдаться роботом в процессе движения, то мы получим нечеткую пространственно-семантическую сеть, или нечеткую карту. Используя такую карту, можно, в частности, осуществлять навигацию робота по наблюдаемым реперам, т.е. по объектам, положение которых было заранее известно [2] .

Объекты рабочей сцены, в свою очередь, описываются субфреймами, содержащими их геометрические и физические признаки $П_i$, выраженные с использованием лингвистических переменных: <объект m: $П_1$, $П_2$, …,$П_m$>. Нечеткие признаки объектов (протяженный объект, большая высота, большой размер и т.п.) задаются функциями принадлежности соответствующих лингвистических переменных, которые задаются заранее [3]. Функции принадлежности этих лингвистических переменных, как и функции принадлежности, описывающие пространственные отношения, должны быть согласованы с техническими характеристиками мобильного робота и системы технического зрения. Тем самым обеспечивается согласование характеристик информационной системы КР с характеристиками пространственного восприятия человека.

Важная особенность задачи управления с использованием нечеткой модели рабочей сцены мобильным роботом, снабженным системой технического зрения, состоит в том, что в процессе движения меняется масштаб изображения, воспринимаемого телекамерой, установленной на роботе. Этот эффект приводит к необходимости введения двумерной функции принадлежности для определения текущего положения робота на плоскости. Например, функция принадлежности по курсовому углу («немного справа», «справа» и т.п.) зависит также и от дальности D. Эта особенность системы технического зрения соответствует закону пространственной перспективы, свойственному зрительному восприятию пространства человеком [3]. Тем самым облегчается задача взаимного «понимания» модели пространства человеком и роботом.

Поскольку внешний мир непрерывно изменяется как за счет движения наблюдаемых объектов, так и за счет движения самого робота, то и описание ситуации изменяется во времени. Это обстоятельство требует учета в общем случае не только пространственных, но и временных отношений во внешнем мире, таких как «быть одновременно», «быть раньше», «следовать за». Такие отношения приходится использовать, в частности, при управлении мобильными роботами, перемещающимися в пространстве, содержащем другие движущиеся объекты [4]. Они позволяют обеспечить автоматическое сопровождение подвижных объектов, или избежать столкновения с ними. Например, для того, чтобы избежать столкновения с движущимся объектом, нужно предсказать его будущую траекторию и, в том случае, если она пересекает траекторию движения КР, следует ввести указание «быть раньше» в точке пересечения. Указание «следовать за» означает движение КР на расстоянии, не превышающем установленного от объекта сопровождения.

В общем случае ситуация S определяется фреймом, слотами которого служат имена объектов внешнего мира, естественные отношения между объектами, как пространственные, так и временные, а также другие признаки, характеризующие ситуацию. Получаемая таким образом оценка ситуации роботом представляет собой не что иное, как формализованную и осредненную оценку аналогичной ситуации человеком.

Совокупность обозначений (имен) заданных объектов в пространстве рабочей сцены и нечетких отношений между ними составляют словарь формального языка описания ситуации. Для того чтобы получить описание ситуации на этом языке нужно определить синтаксис этого языка и семиотическое представление предложений. Используя введенную Д.А.Поспеловым терминологию, можно назвать язык используемых для описания ситуаций формально-логических отношений, ситуационным языком. На ситуационном языке может быть организован диалог между роботом и человеком при анализе ситуации. «Образ» текущей ситуации может включать и другие признаки, помимо пространственных отношений и идентифицированных объектов. Например, мобильный робот, предназначенный для охраны помещения, может иметь датчики температуры, влажности, состава воздуха (наличия вредных

веществ или задымления), акустические датчики. Вся информация, получаемая с помощью таких датчиков, также может быть представлена в форме нечетких сообщений *(«температура низкая, влажность очень высокая, сильное задымление»* и т.п.) [5].

Операции во внешнем мире и их планирование

Получив команду оператора, робот должен интерпретировать цель как новое состояние внешнего мира, т.е. построить новую семантическую сеть. Для этого необходим тезаурус, позволяющий по имени операции сформулировать ее цель как новое состояние мира. Например, операция <*поставить*> <*куб*> <*на стол*>, генерирует фрейм *(*<*куб*>, <*стоит на*>, <*столе*>*)*. Правильное представление нового состояния мира (в соответствии с задачей) можно интерпретировать как «понимание» роботом задачи, поставленной оператором. Проверка этого «понимания» достигается путем диалога, т.е. робот должен сообщить оператору свою интерпретацию цели.

Цель, поставленная роботу человеком-партнером, не всегда достижима. Анализ корректности команды включает в себя два аспекта – корректность заданной цели, т.е. возможность ее существования как таковой, и возможность ее реализации данным роботом в данных условиях. Корректность цели (постусловия выполнения операции) определяется наличием геометрических и физических ограничений в модели мира. Это еще одна система правил, которая должна быть заложена в систему знаний робота заранее. Например, состояние <А *стоит на* Б>, предполагает проверку таких предусловий как «*поверхность Б близка к горизонтальной*», «*А соприкасается с Б по поверхности, близкой к плоскости*», «*проекция центра тяжести А находится внутри контура соприкосновения А с Б*», «*Б обладает достаточной жесткостью, чтобы не разрушиться под весом А*» и т.д. При отсутствии таких правил в базе знаний, по крайней мере, части из них, робот может обратиться к оператору с запросом, касающимся корректности задания цели. Содержание этих запросов либо определяется структурой ограничений, извлекаемых из описания нового состояния мира, либо имеет более общий характер. При отсутствии уверенности оператора в корректности поставленной цели он может поручить роботу выполнение когнитивных действий в соответствии с запросами последнего. Например, на запрос робота «Вы уверены, что на *Б* достаточно свободного места?» может последовать ответ: «Исследовать», что порождает когнитивную операцию, требующую перемещения робота, снабженного соответствующими средствами наблюдения (техническим зрением, лазерным дальномером) для исследования поверхности *Б* и соотнесения имеющегося свободного места с размерами *А*.

Применительно к мобильному роботу вполне уместно говорить о его «поведении» на рабочей сцене. Можно априори выделить стереотипы поведения, определяемые сложившейся ситуацией. Их иногда рассматривают как аналог условно-рефлекторного поведения «стимул-реакция». Эти стереотипы поведения имеют вид продукционных правил: *«если ситуация есть* S_i *, то тактика* T_i*»*. Под тактикой мы понимаем совокупность (нечетких) правил поведения, выраженных с помощью лингвистических переменных и определяемых поставленной целью. Эти правила ставят в соответствие типовой ситуации заранее определенное движение робота. При этом предполагается, что типовые ситуации можно заложить в нечеткую базу знаний робота. С использованием этой базы можно составить совокупность правил поведения, соответствующих таким действиям как преследование подвижного объекта, выход в определенную точку, заданную на электронной карте, проход в дверной проем, обход внезапно появившегося препятствия на пути к цели, и т.п. Оператор может управлять робототехнической системой, непосредственно задавая на проблемно-ориентированном языке элементарные операции, например, ‹*перенести объект А на плоскость С*› ‹*вставить вал А в отверстие О*›. В более сложных ситуациях целесообразно, чтобы система самостоятельно строила цепочку согласованных ЭО, подключая оператора к этой процедуре только как эксперта при возникновении неоднозначных, или непреодолимых ситуаций, т.е. планировала выполнение сложных операций.

Для генерации последовательности элементарных операций (ЭО), приводящих к цели, используется процедура разрешения противоречий [6]. Принцип разрешения противоречий достаточно близок к когнитивной деятельности человека при планировании действий, в которой также проводится постоянное сопоставление оперативного образа ситуации и образа цели. Использование этого принципа разрешения противоречий требует дальнейшего расширения ситуационного языка диалога. Помимо «словаря» типовых операций теперь требуется и «словарь» для разрешения ситуационных противоречий путем выполнения типовых операций. Если пространственные

отношения интенциональные, то каждый тип противоречий порождает свою типовую операцию для своего разрешения. Например: *если цель: (a_1 R_8 S),* т.е. объект a_1 стоит на поверхности S , а реально *(a_1 ⌐R_8 S),* то противоречие порождает типовую операцию *перенести a_1 на S* . Если отношения экстенциональные, то специального словаря соответствия между ситуацией и требуемой типовой операцией не требуется. Противоречие может быть разрешено путем выполнения типовой операции, целью которой является отношение, заданное в ее условии. Если мобильный робот R должен находиться относительно наблюдателя *N в положении (R d_1 f_1 N)*, а реально выполняется другое условие: *(R d_2, f_2 N),* то требуемая операция определяется в форме: *переместить робот R из положения (R d_2 f_2 N) в положение (R d_1 f_1 N).*

Заметим, что тактика поведения робота не всегда предполагает непосредственное наблюдение цели. Так, при разработке способов управления противопожарным роботом, функционирующим в условиях задымления, было предложено использовать в качестве измеряемого параметра градиент температуры в скалярном температурном поле, имеющем место при закрытом пожаре. Вычисляя этот градиент, можно осуществить управление роботом методом пропорциональной навигации, при котором угловая скорость робота пропорциональна угловой скорости линии визирования, направленной в воображаемую целевую точку [5]. В этом случае робот способен выполнить указание человека-партнера: «*Найти очаг возгорания*»**.**

Специфика управления мобильным роботом в динамической среде состоит в том, что движение препятствий нельзя рассчитать заранее. Чтобы избежать столкновений с движущимися препятствиями, необходимо знать их положение и предсказывать траекторию их движения. Тогда можно двигаться вдоль спланированной траектории, отклоняясь от нее в нужный момент, чтобы совершить маневр и объехать препятствие [4]. Задачи следования вдоль спланированного маршрута и обхода подвижных препятствий решаются совместно, так как при движении по заданной траектории подвижные объекты могут оказаться вблизи этой траектории. В этом случае необходимо совершить маневр обхода.

При сопровождении роботом человека-оператора, или при полуавтоматическом управлении движением КР может произойти потеря связи робота с оператором. В этом случае возникает задача движения КР в пространстве рабочей сцены с автоматическим возвращением робота к пользователю при потере связи. Для решения этой задачи может быть использована визуальная одометрия - метод оценки линейного и углового смещения робота с помощью анализа последовательности изображений, снятых установленной на нем парой камер [7]. Определение координат робота даёт возможность построить траекторию автоматического возвращения к оператору с помощью сплайнов третьей степени. Экспериментальные исследования показали, что наилучшие результаты могут быть получены путем комплексирования данных визуального одометра с данными колесной одометрии и с данными инерциального измерителя угловой скорости.

Речевой интерфейс и эмоциональное сопровождение диалога

Речевой интерфейс является основным способом задания управляющей информации для диалоговой системы управления когнитивным роботом. Речевой интерфейс включает в себя модуль распознавания и лингвистический модуль. Модуль распознавания представляет собой устройство для преобразования речевых сигналов и их интерпретации в качестве отдельных слов или фраз. Лингвистический анализатор осуществляет синтаксический и семантический разбор высказывания, в результате которого должны быть заполнены слоты фрейма для описания действий.

Высказывания, представленные на языке ситуационного управления, могут быть выражены на внутреннем семиотическом языке, т.е. сведены к последовательности символов. В свою очередь, команда оператора, поступающая от модуля распознавания речи, также является последовательностью символов. Таким образом, взаимодействие модуля распознавания и лингвистического модуля сводится к преобразованию одной последовательности символов в другую на базе грамматики, построенной экспертом. При этом сам лингвистический анализатор может быть представлен в форме конечного автомата [8]. Практически все, используемые в настоящее время способы распознавания речи, основаны на сравнении произносимых слов с эталоном. Учитывая, что словарь языка ситуационного управления ограничен, целесообразно предварительно составить базу используемых слов и иметь возможность в реальных условиях дополнять базу робота (дообучать его) новым словам, которые отсутствуют в базовом словаре. В большинстве работ, использующих такую концепцию, предполагается реализация модуля распознавания с помощью нейронных сетей. Так, в [9] для распознавания слов естественного языка используется трехслойная сеть Хэмминга. Сеть

предварительно обучается на произношение базовых слов команды определенным пользователем. Этим, в частности, решается и задача обеспечения информационной безопасности системы управления, т.е. устраняется возможность доступа постороннего пользователя к управлению КР.

Диалог представляет собой последовательность речевых сообщений, которыми обмениваются робот и оператор. Исходным состоянием диалога служит команда оператора, структура которой была рассмотрена выше. Чаще всего развитие диалога происходит по одному из следующих сценариев: уточнение состава команды, или уточнение операции. Сам сценарий описывается прото-фреймом, а конкретная реализация диалога фиксируется в виде фрейма-экземпляра. Например, для сценария «уточнение состава команды» прото-фрейм имеет следующий вид: *<исходный текст команды>, <недостающий компонент>, <фокусирующий запрос оператору>, < вторичный текст команды>, < число итераций>, < окончательный вид команды>*.

Одной из реализованных нами моделей диалога человека и робота оказались модели, основанные на использовании сетей Петри. Эти сети позволяют осуществить моделирование асинхронного диалога, они удобны для формализации задачи машинного обучения [8]. Менеджер диалога в процессе своей работы в разработанной системе речевого диалогового управления обращается к модулю планирования и запрашивает предсказания дальнейшего состояния модели мира и решения по дальнейшим действиям вплоть для достижения цели.

Интерфейс КР в общем случае имеет многомодальную структуру и не сводиться к обмену речевыми сообщениями, но может включать также и жесты. Дальнейшим развитием многомодального интерфейса является его дополнение системой двусторонней оценки эмоционального состояния оператора и имитации такого состояния роботом-партнером [10]. Для воспроизведения эмоций предлагались различные способы – чаще всего это либо компьютерная графика, либо антропоморфная конструкция, обтянутая искусственной кожей и, как правило, являющаяся копией лица конкретного человека.

Формализация определенного эмоционального состояния может быть достигнута с помощью описания мимики в виде массива «показателей движения» (*action unit*, AU), характеризующих определенное эмоциональное состояние [11]. Используя такую формализацию, можно реализовать адаптивную нейросеть, основанную на системе нечеткого вывода и позволяющую определить эмоциональное состояние по наблюдаемому мимическому состоянию лица. Может быть решена и обратная задача – воспроизведение определенного мимического состояния на «лице» робота [10]. Поскольку КР предусматривает интерактивное речевое общение с человеком, то визуализацию «эмоционального» состояния целесообразно использовать в качестве артикуляции речи, т.е. её «эмоционального сопровождения». Такая поддержка речевого диалога существенно облегчает понимание сообщений человеком, что и особенно важно в экстремальных ситуациях.

Заключение

Роль оператора – пользователя коллаборативного робота существенно изменяется по сравнению с управлением обычным роботом. По существу, это вообще не задача управления, в которой присутствует управляющий субъект и объект управления. Теперь оператор управляет не отдельными движениями, а предметной деятельностью, или поведением робота путем постановки задач подобно тому, как он работал бы с человеком-ассистентом. Задача управления существенно облегчается тем, что робот способен к автономному управлению. Планирование роботом своих действий с учетом непрерывно изменяющейся рабочей среды обеспечивает безопасность его применения в людном помещении. Речевое общение делает доступным управление роботом пользователем, не имеющим специальной подготовки. Задача «взаимопонимания» человека и КР может быть существенно облегчена за счет средств имитации «эмоционального состояния» КР и анализа состояния самого оператора.

Большое значение для обеспечения эффективности управления приобретает и анализ психологических проблем взаимодействия человека и «интеллектуальной» робототехнической системы, связанных с «взаимным» пониманием ситуации и задачи, а также выборе наиболее целесообразного поведения для достижения поставленной цели. К новым задачам, которые требуют внимания исследователей КР, следует отнести задачу «смешанного» многоагентного управления, т.е. задачи управления коллективами, включающими и людей и группы роботов. Особую роль в изучении проблем управления коллаборативными роботами должны играть проблемы психологии взаимодействия человека и робота.

1. Ющенко А.С. Диалоговое управление роботами на основе нечеткой логики. Экстремальная робототехника: Сборник докладов всероссийской научно-технической конференции. — СПб: Изд-во «Политехника-сервис». 2015. С. 143-146.
2. Ющенко А.С. Маршрутизация движения мобильного робота в условиях неопределенности. Мехатроника, автоматизация и управление. 2004, № 1.
3. Володин Ю.С., Михайлов Б.Б., Ющенко А.С. Нечеткая классификация препятствий мобильным роботом с использованием телевизионной системы пространственного зрения.// Сб. научных трудов 6-й международной научно-практической конференции «Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте» - М.: Физ.мат.лит. 2011. Т.1. С.372-380
4. Михайлов Б.Б.., Назарова А.В., Ющенко А.С. Автономные мобильные роботы- навигация и управление. – Известия ЮФУ. Технические науки, №2, стр. 48-67
5. Ющенко А.С., Тачков А.А. Интегрированная система управления пожарным разведывательным роботом. Вестник МГТУ им. Н.Э.Баумана. М.,2012. Приборостроение..Спецвыпуск №6. «Робототехнические системы». С.106-111
6. Ющенко А.С. Интеллектуальное планирование в деятельности роботов.// Мехатроника, автоматизация, управление. 2005. №3. С.5-18.
7. Девятериков Е. А., Михайлов Б. Б. «Визуальный одометр». Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2012. Спец. вып. №6. С. 68-82
8. Жонин А.А. Алгоритм обучения менеджера диалога речевой диалоговой системы управления роботом. Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте. Сб. научных трудов международной конференции. М.: Физ. мат. лит, 2011, с.395-406
9. Majewski M., Kacalak W. Speech-Based Interfaces with Augvtnyed Reality and Interactive Systems for Controlling Mobile Cranes. - First international Conference, ICR 2016 / Ed. by A.Ronzhin, G. Rigoll, R. Meshcheryakov. Springer, LNAI 9812 pp. 89-98
10. Yuschenko A., Vorotnikov S., Konyshev D., Zhonin A. Mimic Recognition and Reproduction in Bilateral Human-Robot Speech Communication. Interactive Collaborative Robotics. First international Conference, ICR 2016 / Ed. by A.Ronzhin, G. Rigoll, R. Meshcheryakov. Springer, LNAI 9812 pp. 133-142
11. Ekman P., Friesen W., Hager J. Facial Action Coding System (FACS), [Электронный ресурс] http://www.paulekman.com/facs/, 2002 - Date of access 01.08.2014

I.V. Voinov, A.M. Kazantsev, B.A. Morozov, M.V. Nosikov

RADIATION-PROOF MANIPULATORS AND METHODS FOR EXTENDING THEIR FUNCTIONALITY

Miass branch of South Ural State University (National Research University)
Miass, Russian Federation
voinoviv@susu.ru, kazantcevam@susu.ru, nosikovmv@susu.ru

Abstract

This work covers the architecture and functional specifications of a 6-motion axis manipulator MR-48 designed for the replacement of an outdated human-driven copying-type manipulator MEM-10. The main technical requirements for the mechanical design and operating conditions are presented. The article describes the structure of the manipulator and its control system, operating modes, math algorithms of inverse kinematic problem, control system algorithms, human-machine interface of manipulator software.Annotation text.

Key words: robot, manipulator, nuclear industry, inverse kinematic calculation, Denavit-Hartenberg parameters, control system.

И.В. Войнов, А.М. Казанцев, Б.А. Морозов, М.В. Носиков

РАДИАЦИОННО-СТОЙКИЕ МАНИПУЛЯТОРЫ И МЕТОДЫ РАСШИРЕНИЯ ИХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ

Филиал ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)» в г. Миассе
г. Миасс Челябинской обл., Российская Федерация
voinoviv@susu.ru, kazantcevam@susu.ru, nosikovmv@susu.ru

Аннотация

В докладе описаны технические требования, состав и функциональные характеристики роботов-манипуляторов для работы в условиях сильных радиационных полей, конструкция робота-манипулятора МР-48, разработанного для замены устаревших электромеханических копирующих манипуляторов, применяемых в атомной промышленности. Приведены предпосылки к созданию робота-манипулятора данного типа, основные требования технического задания, условия эксплуатации манипулятора. Представлены структурная схема и режимы работы манипулятора, математический аппарат для решения обратной кинематической задачи, человеко-машинный интерфейс программного обеспечения разработанного манипулятора. Рассмотрены задачи повышения функциональных возможностей манипуляторов данного типа и подходы к их решению.

Ключевые слова: Робот-манипулятор, атомная промышленность, кинематическая задача, представление Денавита-Хартенберга, система управления.

Введение

В настоящее время на целом ряде предприятий атомной промышленности РФ при проведении лабораторных исследований и в производственном цикле широко используются электромеханические манипуляторы типа МЭМ-10 [1]. В процессе работы манипулятор, как правило, крепится к верхней крышке герметичной камеры и по команде оператора, который располагается снаружи камеры, перемещает инструменты, приспособления и технологическую тару с радиоактивными или другими опасными материалами. Управляющее воздействие на приводы внутрикамерного манипулятора задается оператором путем механического (с помощью рук) перемещения кинематически подобного управляющего органа – манипулятора, размещенного на рабочем месте оператора. Герметичная камера, внутри которой исполнительным органом (ИО) манипулятора производятся заданные технологические операции, выполняет роль экрана, защищающего персонал от воздействия ионизирующих излучений, а прозрачная стенка камеры обеспечивает возможность визуального контроля оператора за технологическим процессом. Внешний вид манипулятора МЭМ-10 приведен на рис. 1.

При промышленной эксплуатации манипуляторов данного типа с прямым механическим или прямым электромеханическим приводом, помимо очевидных достоинств (однозначное соответствие кинематических конфигураций манипулятора и задающего органа), имеются следующие недостатки:

1. Высокие величины механических нагрузок на руки оператора, высокая утомляемость при длительном выполнении технологических операций.
2. Наличие люфтов в кинематических парах как манипулятора, так и задающего органа, приводящие к потере точности позиционирования, а в ряде случаев – к невозможности выполнения требуемых операций.
3. Фиксированные передаточные отношения (1:1) между задающим органом и манипулятором, что вызывает определенные трудности при осуществлении операций, требующих повышенной точности позиционирования схвата.
4. Невозможность автоматизации операций, выполняемых с помощью манипуляторов данного типа.

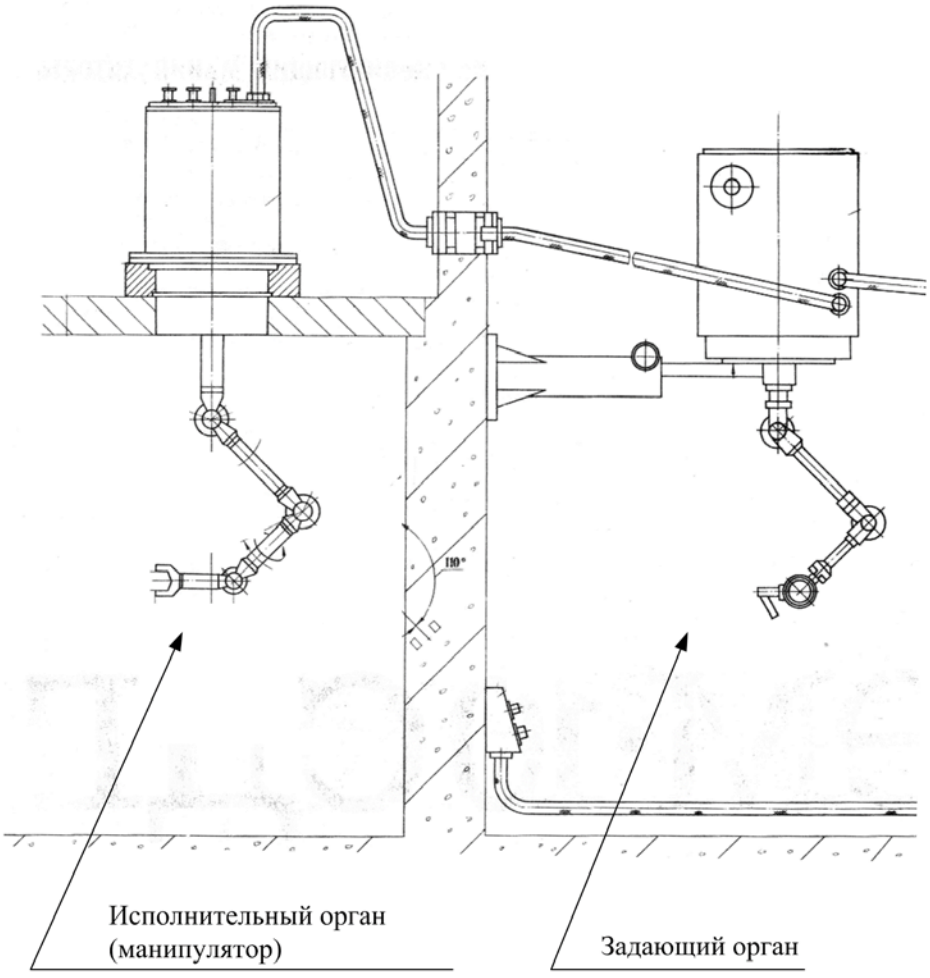


Рисунок 1 – Внешний вид манипулятора МЭМ-10 и его задающего органа

Следует отметить, что большинство копирующих механических и электромеханических манипуляторов для атомной промышленности проектировалось, отрабатывалось и внедрялось в эксплуатацию на рубеже 60-х – 70-х годов XX века, существующие на тот момент технологии не позволяли уйти от вышеприведенных недостатков. На данный момент развитие высоконадежных электромеханических приводов, датчиков, высокоточных механических линейных и вращательных передач, и, главным образом, производительных аппаратных вычислительных средств и программных алгоритмов позволяют реализовывать робототехнические комплексы с высоким уровнем автоматизации и интеллектуализации, обеспечивать выполнение такими комплексами различных операций в широком диапазоне линейных и угловых перемещений и скоростей с высокой точностью.

Необходимость использования манипуляторов в условиях сильных радиационных полей, кроме обычных для промышленных роботов требований по грузоподъемности, точности позиционирования и рабочей зоне обслуживания, содержит и ряд специфических требований, главным из которых является обеспечение работоспособности исполнительного органа манипулятора при высоких уровнях ионизирующих излучений и наличия химически активной среды внутри герметичной камеры. С целью выполнения данных требований, в конструкции исполнительного органа необходимо предусмотреть следующее:

– электронные устройства системы управления манипулятора должны быть выполнены либо на радиационно-стойкой элементной базе (что значительно увеличивает стоимость манипулятора), либо защищены свинцовым экраном (что приведет к увеличению массогабаритных параметров манипулятора, и, как следствие, к необходимости повышения мощности применяемых электродвигателей), либо вынесены за пределы герметичной камеры (например, реализованная в МЭМ-10 система типа «сельсин-датчик – сельсин-приемник» монтируется вне герметичной камеры);

– конструкция манипулятора должна исключать (либо минимизировать) попадание элементов химически активной среды в виде жидкости или твердых частиц внутрь подвижных сочленений манипулятора. Конструкция МЭМ-10 не обеспечивает герметичность его сочленений, в результате чего в процессе эксплуатации под воздействием указанной активной среды происходит частичное разрушение трущихся поверхностей кинематических пар, что приводит к появлению люфтов, зазоров и, как следствие, снижению точности позиционирования схвата манипулятора.

Манипуляторы МЭМ-10 эксплуатируются на предприятиях отрасли с 70-х годов прошлого века, неоднократно исчерпали свой ресурс, морально и физически устарели, а завод-изготовитель прекратил выпуск как самих манипуляторов, так и запасных частей к ним. Комплекс перечисленных проблем обусловливает необходимость скорейшего создания современных роботов-манипуляторов для проведения работ внутри герметичных камер с радиоактивными и другими агрессивными средами.

Лабораторией робототехники филиала Южно-Уральского государственного университета в г. Миассе по заказу одного из ведущих предприятий атомной промышленности проведена опытно-конструкторская работа, в результате которой был спроектирован и изготовлен опытный образец внутрикамерного робота-манипулятора. В соответствии с требованиями технического задания (ТЗ) на проектирование, в состав изделия должен входить 6-степенной исполнительный орган, оснащенный схватом с плавным регулированием усилия его губок, и пульт управления (ПУ) оператора со встроенной системой управления (СУ). ИО должен обеспечивать сферическую зону обслуживания заданного радиуса и требуемую грузоподъемность. В техническом задании определена конструкция стыковочного устройства кисти для стандартных схватов от манипулятора типа МЭМ-10, сформулированы требования к скрытому электромонтажу и размещению силовых приводов внутри герметичных корпусных деталей ИО, заданы геометрические параметры подвижных звеньев, максимальные углы поворота и требуемые угловые скорости в шарнирных соединениях ИО. Требования по условиям эксплуатации включают в себя как климатические факторы (температура окружающей среды, относительная влажность воздуха, рабочее атмосферное давление), так и воздействующие радиационные факторы (гамма-излучение, нейтронное излучение, бета-излучение).

Манипулятор робототехнического комплекса МР-48 конструктивно представляет собой шестизвенный манипулятор с вращательными степенями свободы в каждом сочленении. Кинематическая схема манипулятора, а также системы координат, связанные с каждым из звеньев, заданные в соответствии с правилами Денавита-Хартенберга [1], представлены на рис. 2.

Структурная схема робототехнического комплекса МР-48 представлена на рис. 3.

На лицевую панель пульта управления должна выводиться визуальная информация, необходимая оператору для работы, и размещаться органы управления ИО – джойстики и элементы управления на сенсорном экране. Встроенная в ПУ система управления должна обеспечивать возможность реализации следующих режимов управления:

– отдельно по каждой степени подвижности ИО («Ручной» режим);

– по вектору скорости полюса схвата (режим «Схват»);

– автоматическое воспроизведение запрограммированных траекторий движения с регулируемой скоростью перемещения и заданной точностью позиционирования в контрольных точках (режим «Траектория»);

– сервисный режим для настройки и калибровки манипулятора.

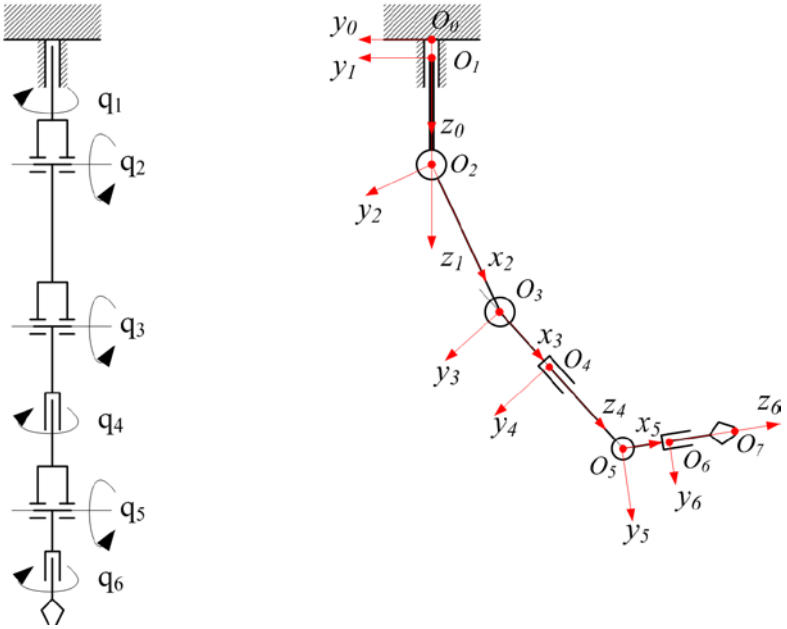


Рисунок 2 – Кинематическая структура манипулятора МР-48

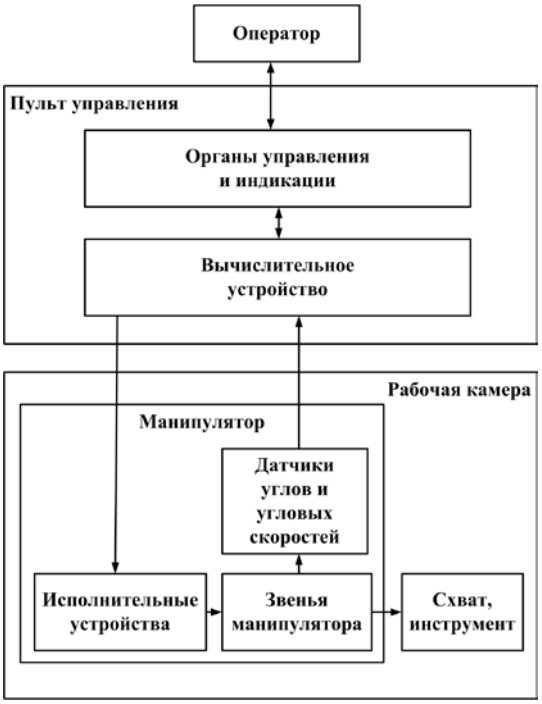


Рисунок 3 – Структурная схема робототехнического комплекса МР-48

Перечисленные режимы управления (за исключением сервисного режима) должны обеспечивать транспортировку исполнительным органом специальной тары с радиоактивным материалом из определенной точки внутри герметичной камеры, в которую посредством межкамерной транспортной системы загружается данная тара, на технологическое оборудование, расположенное так же внутри камеры. После завершения заданных технологических операций ИО перемещает тару на другое оборудование либо осуществляет возврат к межкамерной транспортной системе. При этом режим «Траектория» позволяет выполнять эти операции автоматически, что значительно упрощает работу персонала и снижает риск ошибок при наличии повторяющихся операций. Координаты и последовательность точек траектории движения могут быть заранее внесены в программу, либо система управления запоминает и отслеживает первоначально заданную аппаратом траекторию.

Реализация вышеуказанных режимов управления осуществляется аппаратно-программной системой управления. Ядром системы управления (СУ) является ЭВМ пульта оператора, сопряженная

с органами управления, датчиками и исполнительными устройствами посредством модулей ввода-вывода, также являющимися аппаратно-программными компонентами системы управления. Входными и промежуточными сигналами системы управления манипулятора являются:

1. Воздействия оператора на органы управления Mi ;
2. Мгновенные углы поворота (ориентации) звеньев qi ;
3. Мгновенные угловые скорости поворота звеньев □i ;
4. Требуемые значения углов и угловых скоростей $q_{i\ уст}$, $\omega_{i\ уст}$, формируемые в контурах системы управления.

Выходными сигналами системы управления являются токи I_i (i=1...6, т.е. для каждого исполнительного электродвигателя в составе звена), формируемые в каждый момент времени таким образом, чтобы манипулятор осуществлял требуемый характер движения.

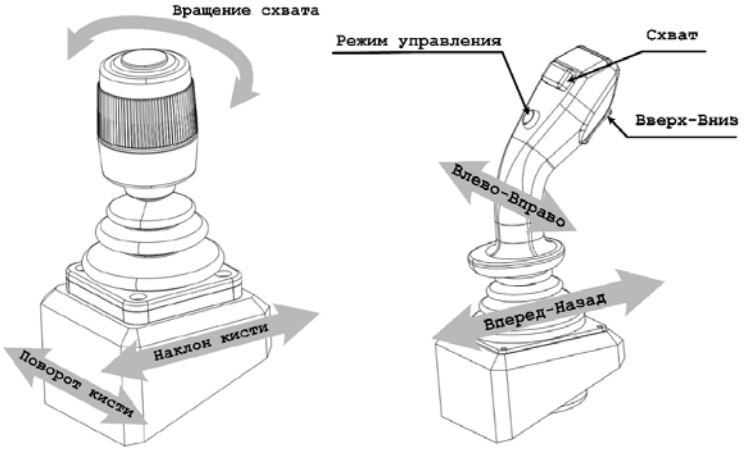
В целом система управления является дискретной, с периодом формирования управляющих воздействий 20 мс. В силу специфики объекта управления (манипулятора) и режимов его работы, СУ реализована в виде нескольких вложенных контуров управления, реализованных на аппаратном, аппаратно-программном либо программном уровнях. Функциональная схема системы управления представлена на рис. 4.

Рисунок 4 – Функциональная схема системы управления с контуром формирования траектории

Режимы управления манипулятором

Оператор управляет исполнительным органом при помощи двух джойстиков, расположенных на пульте управления:

1. Трехстепенной левый джойстик (рис. 5а);
2. Четырехстепенной правый джойстик (рис. 5б).



а) б)

Рисунок 5 – Джойстики управления МР-48

В режиме «Ручного» управления сигналы от каждого из джойстиков интерпретируются системой управления как уставки по скорости по соответствующим осям поворота звеньев. Уставки напрямую подаются в вычислительное устройство, где на частоте 400 Гц отрабатываются системой управления на основе ПИД-регулятора, а затем поступают на силовые электроприводы. Данный режим

предназначен для быстрого изменения общей конфигурации ИО и для вывода его из вырожденных конфигураций, которые могут возникнуть в режиме «Схват».

В режиме «Схват» (управление пространственным и угловым положением схвата ИО) сигналы от джойстиков интерпретируются как уставки по линейной и угловой скорости полюса схвата. Система управления (на рис. 3 – вычислительное устройство) в этом случае формирует команды на электроприводы (рис. 3 – исполнительные устройства) с учетом текущих значений углов поворота осей ИО и угловых скоростей движения каждой оси. Уставки по линейной и угловой скорости могут задаваться как в базовой неподвижной системе координат, связанной с основанием манипулятора, так и в подвижной системе координат, связанной непосредственно со схватом. В зависимости от выполняемых действий оператор выбирает наиболее удобную ему в данный момент систему. Данный режим предназначен для выполнения точных операций с объектами манипулирования.

Для работы в режиме «Схват» управляющая программа решает обратную задачу кинематики. Конфигурация исполнительного органа описывается представлением Денавита-Хартенберга [5].

Управляющая программа вычислительного устройства на частоте 100 Гц получает от бортовой системы управления коды углов поворота и скорости поворота по осям ИО и формирует уставки скорости вращения приводов. На первом шаге такта управления решается прямая задача кинематики и формируется матрица однородных преобразований $\boldsymbol{T}$, описывающая переход в однородных координатах от базовой системы координат к системе координат схвата.

$$T(\theta) = \prod_{i=1}^{6} A_{i-1}^{i}(\theta_i) = \begin{bmatrix} R_{3\times3} & p_{3\times1} \\ 0 \quad 0 \quad 0 & 1 \end{bmatrix}; \tag{1}$$

$$A_{i-1}^{i}(\theta_i) = \begin{bmatrix} cos\theta_i & -cos\alpha_i \cdot sin\theta_i & sin\alpha_i \cdot sin\theta_i & a_i \cdot cos\theta_i \\ sin\theta_i & cos\alpha_i \cdot cos\theta_i & -sin\alpha_i \cdot cos\theta_i & a_i \cdot sin\theta_i \\ 0 & sin\alpha_i & cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \tag{2}$$

где

θ_i – углы поворота по осям манипулятора, i = 1…6,

α_i, a_i, d_i – параметры представления Денавита-Хартенберга, i = 1…6,

$R_{3\times3}$ – матрица ориентации схвата в базовой системе координат,

$p_{3\times1}$ – вектор положения схвата в базовой системе координат.

Матрица R может быть выражена как матрица поворота, представляющего собой результат последовательного выполнения поворотов сначала на угол α вокруг оси OX, затем на угол χ вокруг оси OZ, затем на угол φ вокруг оси OY базовой системы координат:

$$R_{3\times3} = R_{y,\varphi} \cdot R_{z,\chi} \cdot R_{x,\alpha} = \begin{bmatrix} cos\varphi & 0 & sin\varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -sin\varphi & 0 & cos\varphi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} cos\chi & -sin\chi & 0 \\ sin\chi & cos\chi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & cos\alpha & -sin\alpha \\ 0 & sin\alpha & cos\alpha \end{bmatrix} \tag{3}$$

Зная численное значение матрицы *R*, рассчитанное по углам θ_i , *i = 1–6* , можно, разрешив данное уравнение, получить значение углов φ, χ, α.

Вычисление уставок ω(k) по скорости для бортовой системы управления на такте *k*, описывается следующим алгоритмом:

$$\Delta T(k) = T(\theta(k)) \cdot T_*^{-1}(k); \tag{4}$$

$$T_*(k) = D(k) \cdot T_*(k-1),$$
$$k = 1 \ldots \infty, T_*(0) = T\big(\theta(0)\big); \tag{5}$$

$$D(k) = \begin{bmatrix} R_{y,\varphi(k)} \cdot R_{z,\chi(k)} \cdot R_{x,\alpha(k)} & \begin{bmatrix} p_{x(k)} \\ p_{y(k)} \\ p_{z(k)} \end{bmatrix} \\ [0 \quad 0 \quad 0] & 1 \end{bmatrix}; \tag{6}$$

$$\nu(k) = \nu(k-1) + c_\nu \cdot s_\nu \cdot d_\nu(k),$$
$$\nu = \{\varphi, \chi, \alpha\}; \tag{7}$$

$$p_\nu(k) = p_\nu(k-1) + c_\nu \cdot s_\nu \cdot d_\nu(k),$$
$$\nu = \{x, y, z\},$$
$$\nu_0 = \nu; \tag{8}$$

$$s_\nu = \begin{cases} 1, & \text{если } \nu = argmax_\nu(|d_\nu(k)|) \\ 0, & \text{если } \nu \neq argmax_\nu(|d_\nu(k)|) \end{cases}; \quad (9)$$

$$T_*(k) = \begin{cases} T\big(\theta(k)\big), & \text{если } \nu_0 \neq \nu \\ T_*(k), & \text{если } \nu_0 = \nu \end{cases}; \quad (10)$$

$\Delta\overline{T}(k) = \Delta T_{3\times4}(k)$ – матрица, разверн. в столбец 12 х 1;

$\overline{T}(k) = T_{3\times4}(k)$ – матрица, разверн. в столбец 12 х 1;

$J(k) = \left[\frac{\partial\overline{T}(k)}{\partial\theta}\right]$ – якобиан 12 х 6.

Тогда

$$m(k) = \left[K \cdot (J(k) \cdot J(k)^{\mathrm{T}})^{-1} \cdot J(k)^{\mathrm{T}} \cdot \Delta\overline{T}(k)\right], \quad (11)$$

$$\omega(k) = \begin{cases} m(k), & \text{если } \max_i|m_i(k)| \leq 127 \\ \frac{m(k)}{|m(k)|} \cdot 127, & \text{если } \max_i|m_i(k)| > 127, \end{cases}$$

где

c_ν – масштабные коэффициенты,

$d_\nu(k)$ – коды джойстиков на такте k,

$\lfloor x \rfloor$ – округление до целой части;

K – диагональная матрица коэфф. усиления 6×6.

При переключении на режим прямого управления в системе координат схвата (режим «Схват») угловые и линейные сигналы джойстиков предварительно через матрицу $R^{-1}(k)$ преобразуются в базовую систему координат и далее вычисления проводятся как описано выше.

Режим движения по заданной траектории состоит из следующей последовательности шагов:

1. Формируется набор опорных точек в присоединенных координатах (углах поворота осей исполнительного органа). Для данной операции можно использовать любой из реализованных в системе режимов управления. На количество опорных точек и расстояние между ними ограничений не накладывается. Для каждой точки оператор задает относительную скорость ее прохождения от 0 до 1, где 1 соответствует максимально возможной скорости. При непосредственной отработке траектории оператор имеет возможность ограничить максимальную скорость для всей траектории;

2. Выполняется аппроксимация опорных точек кубическим сплайном, что обеспечивает построение гладкой кривой, точно проходящей через опорные точки с заданным значением первой производной. Конкретное значение первой производной определяется по условным ограничениям, наложенным при планировании траектории и заданным в ТЗ максимальным скоростям движения по осям. По полученному сплайну, путем его интерполяции с шагом Δ в пространстве присоединённых координат, формируются два массива. Первый массив θ* содержит точки траектории, а второй ω* – значение скорости в этих точках;

3. Выполняется отработка траектории, описываемая следующим алгоритмом:

$k = 0$ – начальное значение счетчика точек опорной траектории,

$\omega = [0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0]^{\mathrm{T}}$ – начальное значение уставки,

$\mu = [0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0]^{\mathrm{T}}$;

если $k>N$, где N – общее количество опорных точек, то закончить отработку траектории;

$$k = \begin{cases} k+1, \text{если } |\theta - \theta^*(k)| < \Delta \\ k, \quad \text{если } |\theta - \theta^*(k)| \geq \Delta, \end{cases}$$

$$m = \lfloor K_1 \cdot (\alpha \cdot (\omega^*(k) + K_2 \cdot (\theta^*(k) - \theta)) + (1-\alpha) \cdot \mu \rfloor,$$

$$\mu = \omega,$$

α = 0.2–0.3,

$$\omega = \begin{cases} m, & \text{если } \max_i|m_i| \leq 127 \\ \frac{m}{|m|} \cdot 127, & \text{если } \max_i|m_i| > 127, \end{cases}$$

где θ – вектор текущих углов поворота ИО,

Δ – допуск на приведение в точку траектории.

Практическая реализация робототехнического комплекса МР-48

Расчет и проектирование опытного образца МР-48 выполнятся по техническому заданию с учетом следующих исходных данных по условиям эксплуатации (табл. 1, 2):

Таблица 1. Климатические условия эксплуатации МР-48

№	Климатический фактор	Климатические условия
1	Температура окружающей среды, °С: рабочая хранения	 -15 – +35 -25 – +55
2	Относительная влажность воздуха, %: среднее значение	80% при 20°С
3	Рабочее атмосферное давление, кПа (мм рт.ст.):	86,6 (650) – 106,7 (800)

Таблица 2. Допустимые уровни ионизирующих излучений при эксплуатации МР-48

№	Воздействующие факторы	Характеристики воздействующих факторов	Значения
1	Гамма-излучение	Максимальная мощность экспозиционной дозы с энергией от 0,1 до 3 Мэв, Гр/ч, экспозиционная доза, Гр	 10 1000
2	Нейтронное излучение	Флюенс нейтронов при плотности потока 10^2 н/см^2 со средней энергией 0,1 Мэв, н/см^2	 10^8
3	Бета-излучение	Плотность потока бета-частиц, 1/мин см^2 Флюенс бета-частиц, 1/см^2	1-10000 10-10000

ИО манипулятора имеет следующие характеристики:

– число степеней подвижности – 6;

– общая длина подвижных звеньев – 900 мм;

– погрешность позиционирования в контрольных точках (режим «Траектория») – не более ± 1 мм;

– грузоподъемность максимальная при вылете руки 900 мм – 10 кГ;

– сила сжатия губок схвата – не менее 100 Н;

– максимальные угловые скорости относительного вращения звеньев по осям, угл. град./с, не менее:

ротация плеча	± 40	ротация предплечья	± 90
качание плеча	± 40	качание кисти	± 90
качание предплечья	± 90	ротация схвата	± 90

– максимальные углы поворота звеньев, угл. градусы от исходного положения, не менее:

ротация плеча	± 190	ротация предплечья	± 190
качание плеча	± 110	качание кисти	± 110
качание предплечья	± 110	ротация схвата	n * 360

Система управления и пульт управления исполнительным органом выполнены в виде моноблока, устанавливаемого непосредственного на рабочем месте оператора перед герметичной камерой. Все внешние элементы ИО манипулятора выполнены из нержавеющих сплавов. Степень герметичности конструкции манипулятора соответствует IP65 [6].

Масса пульта управления – 30 кг, масса исполнительного органа – не более 65 кг. Источник питания манипулятора – однофазная сеть 180–260 В, 50 Гц. Мощность потребления робота-манипулятора – не более 1 кВт.

Внешний вид исполнительного органа и пульта управления приведены на рис. 7 (а,б).

а) б)

Рисунок 7 – Общий вид манипулятора МР-48 и его пульта управления

В настоящее время образец робота-манипулятора проходит этап опытно-промышленной эксплуатации и отработки технологии выполнения операций у заказчика в одной из рабочих камер производства. Конструкция и элементы системы управления защищены патентом РФ № 172431 [7].

Расширение функциональных возможностей радиационно-стойких манипуляторов

В рамках дальнейшего комплекса работ по повышению эксплуатационных характеристик радиационно-стойких манипуляторов можно выделить следующие научно-технические задачи:

1. Повышение удобства управления манипуляторами от задающих органов (без использования кинематически-подобных задающих органов). Проблема является достаточно актуальной, т.к. в отличие от управления кинематически-подобным задающим органом, конфигурация которого однозначно соответствует конфигурации манипулятора, при управлении от задающих органов любого другого типа однозначность соответствия положений теряется. Проблема может быть решена путем повышения информативности системы визуализации робототехнического комплекса, в том числе одновременным построением нескольких проекций манипулятора, его 3D-модели, организации дополнительных точек виртуального визуального контроля. В качестве дополнительного канала может быть использован и звуковой канал информирования о достижении заданных конфигураций или режимов.

2. К данной задаче также можно отнести реализацию интерактивных режимов формирования контрольных точек траектории, требуемого положения и ориентации схвата манипулятора путем задействования дополнительных каналов управления задающих органов.

3. Реализация интерактивных режимов настройки ограничений рабочих зон манипулятора. Выполнение операций в ограниченных внутренних объемах защищенных камер и боксов, а также наличие в них технологического и лабораторного оборудования накладывает дополнительные ограничения на рабочую зону манипулятора. При этом встает вопрос о быстрой конфигурации рабочей зоны инженерно-техническим персоналом предприятия. С математической точки зрения описание геометрических ограничений в трехмерном пространстве не составляет сложностей, а основной упор делается на программные алгоритмы синтеза виртуальной рабочей зоны, ее визуализации и позиционирования объектов.

4. Реализация «динамического» ручного режима управления с учетом геометрических ограничений (границы рабочей зоны). Данный режим предполагает функциональную зависимость коэффициента передачи цепи «оператор» – «задающий орган» – «манипулятор» от положения схвата манипулятора в виде поля неотрицательных скалярных коэффициентов в пространстве R^3, в том числе автоматически формирующегося при перестроении геометрии рабочей зоны.

5. Введение режима автоматической работы с технологической тарой (взятие, возвращение) путем идентификации ее положения, ориентации и геометрических размеров оптическими средствами при нахождении схвата манипулятора в определенном секторе рабочей зоны. Данный режим может быть полезен при типовых операциях с ограничением по времени и может быть дополнен оптической идентификацией уникального номера технологической тары (штрих-коды различного типа).

6. Введение поддержки режимов выполнения (сопровождения) операций двумя манипуляторами путем организации между их децентрализованными системами управления информационного обмена сообщениями о положении, параметрах траектории, режиме выполнения технологической операции и путем организации соответствующего человеко-машинного интерфейса.

7. Реализация режима тренажерного обучения, контроля за действиями оператора с фиксацией предаварийных и аварийных ситуаций и действий оператора с возможностью их воспроизведения, в том числе многократного. Данный режим предполагает автоматическую регистрацию как воздействий оператора, так и текущего вектора состояния манипулятора, системы управления и запись данной информации во внутреннюю или внешнюю базу данных. При этом, как и в классических тренажерных системах, возможно создание нетиповых или аварийных ситуаций с целью повышения навыков и квалификации операторов.

8. Введение обратной связи по усилиям в точке схвата и кинематических парах манипулятора, что при выполнении ряда технологических операций является необходимым.

9. Интеграция робототехнического комплекса в систему управления технологическим процессом или производством для реализации принципа сквозного иерархического управления и наблюдения. При этом как режимы работы (например, планируемый на смену перечень технологических операций с их временными характеристиками), так и факты завершения выполнения определенных этапов (а в ряде случаев, количественные параметры работы, в том числе и от сопутствующего лабораторного оборудования) сообщаются системе более высокого уровня.

Вышеприведенный функционал реализуется в виде иерархического принципа построения программных модулей с реализацией эффективных методов межпроцессного обмена. Ключевым фактором построения подобных систем (с учетом специфики отрасли) является использование высоконадежных программных систем жесткого реального времени (операционных систем реального времени, ОСРВ). На рис. 8 представлена общая структурная схема программного обеспечения робототехнического комплекса МР-48.

На рисунке введены следующие обозначения информационных (логических, межпроцессных) шин обмена данными:

1. Шина обмена данными с другими манипуляторами.
2. Общесистемная информационная коммуникационная шина обмена высокоуровневыми сообщениями.
3. Шина обмена сигналами от задающих органов.
4. Шина информации от подсистем измерения внешней информации.
5. Шина величин управляющих воздействий на манипуляторы.
6. Шина текущей статусной информации о состоянии манипулятора.

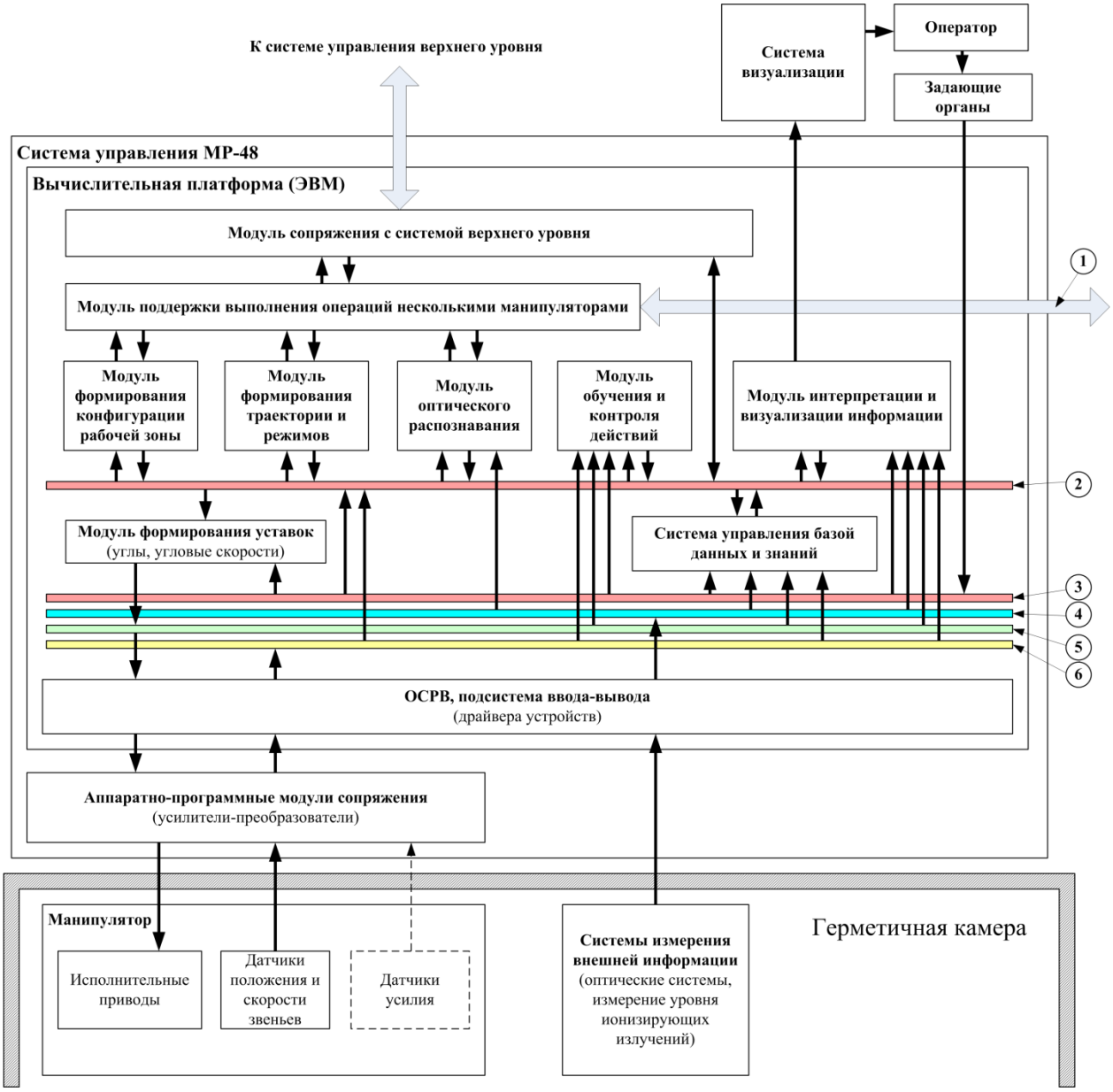


Рисунок 8 – Структура программного обеспечения робототехнического комплекса МР-48

Заключение

С целью замены устаревшего комплекса роботов-манипуляторов для сопровождения выполнения ряда технологических операций производства предприятий атомной отрасли, в рамках выполненного комплекса работ создан научно-технический задел, разработан и изготовлен опытный образец робототехнического комплекса МР-48, созданы алгоритмы и соответствующее программное обеспечение.

Робот-манипулятор МР-48 имеет следующие преимущества перед используемым в настоящее время манипулятором МЭМ-10:

1. Более широкие функциональные возможности, позволяющие реализовать три режима управления, включая автоматический режим «Траектория»;
2. Потребляемая мощность МР-48 составляет 1 кВт, что значительно ниже мощности, потребляемой МЭМ-10 (6 кВт);
3. Герметичность конструкции исполнительного органа МР-48 предотвращает попадание химически активной среды внутрь ИО, чем обеспечивается повышенная износостойкость кинематических пар и повышается точность позиционирования. Кроме того, повышенная ремонтопригодность МР-48 обусловлена модульным принципом конструкции ИО, в частности, применением планетарно-

циклоидных передач, каждая из которых выполнена в отдельном корпусе, в отличие от длинных валов с коническими зубчатыми парами в конструкции МЭМ-10.
4. Юревич Е.И. Основы робототехники. – СПб: БХВ-Петербург, 2010. – 368 с., ил.
5. И.В. Войнов, И.Ф. Круглов, Б.А. Морозов, Д.Ю. Смекалин. Мобильный робототехнический комплекс «Богомол 3М»: пат. №56996 РФ, МПК7 F42D5/04.
6. https://www.maxonmotor.com (дата обращения 01.09.2016). Электронный каталог производителя элекетроприводов MAXON (Швейцария) – URL: https://www.maxonmotor.com/maxon/view/catalog/ (дата обращения 01.09.2016).
7. Материалы международного семинара «Планетоходы, космическая робототехника и наземные роверы для экстремальных условий», Санкт-Петербург, 2006 г.
8. Зенкевич С.Л., Ющенко А.С. Управление роботами. – М: Издательство МГТУ им. Баумана, 2000. – 400 с.
9. ГОСТ 14254-96 «Степени защиты, обеспечиваемые оболочками (код IP)».
10. И.В. Войнов, И.Ф. Круглов, Б.А. Морозов, А.М. Казанцев, М.В. Носиков. Манипулятор МР-48 для атомной промышленности: пат. №172431 РФ, 2016г., МПК7 F42D5/04.
11. А.М. Казанцев, М.В. Носиков «Алгоритмическое обеспечение зон безопасности манипулятора МР-48», Наука ЮУрГУ [Электронный ресурс]: материалы 69-й научной конференции. Секции технических наук. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2017
12. Юревич Е.И. Динамика управления роботами. / В.В. Козлов, В.П. Макарычев – М: Наука, 1984. – 336 с.
13. Юревич Е.И. Интеллектуальные роботы. / И.А. Каляев, В.М. Лохин и др. – М: Машиностроение, 2007. – 360 с.
14. P. Corke. Robotics, Vision and Control: Fundamental algorithms in MATLAB, – Springer, 2011, 570p.
15. Dan B. Marghitu. Mechanisms and Robots Analysis with MATLAB. – Springer, 2009, 479p.
16. Robert H Sturges. Practical field robotics : a systems approach. – Wiley, 2015, 479p.
17. Field and Service Robotics. Results of the 8th International Conference. – Springer Heidelberg New York Dordrecht London, 2014, XIII, 658 p., 426 illus.

V.K. Abrosimov, V.V. Eliseev

INTELLECTUAL ROBOT FOR PRECISIONAL AGRICULTURE

Scientific and Technical Center "RoboPROB", Moscow
avk787@yandex.ru

Abstract

The idea of a line of small-sized, efficient robots with an intelligent control system for precisional agriculture is discussed. Such robots can be equipped with vision systems, various types of soil-extractor, equipment for applying fertilizers, destroying weeds and pests, etc.

Key words: robot, digital agriculture, intelligence, management, soil-extractor.

В.К. Абросимов, В.В. Елисеев

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ АГРОРОБОТ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ТОЧНОГО ЗЕМЛЕДЕЛИЯ

ООО Научно-технический центр «РобоПРОБ», Москва
avk787@yandex.ru

Аннотация

Обсуждается идея разработки линейки небольших по размерам, эффективных роботов с интеллектуальной системой управления в интересах решения разнообразных сельскохозяйственных задач (агророботов). Предполагается, что на таких роботах могут устанавливаться системы технического зрения, почвоотборники различного типа, оборудование для внесения удобрений, уничтожения сорняков и вредителей и др.

Ключевые слова: робот, цифровое сельское хозяйство, интеллект, управление, почвоотборник.

В настоящее время активное развитие получила идея так называемого "цифрового земледелия". К сожалению, журналистская терминология активно проникает в научные публикации, существенно затуманивая суть проблемы. Как говорят «…маркетологи выигрывают сражение у инженеров». С одной стороны, специалисты в области технических наук продвигают современные научно-технические идеи в сельскохозяйственную сферу; при этом появляются красивые по названиям и в целом интересные по сути проекты типа "умного поля", "беспилотного комбайна" и др. С другой-руководство и работники агрохолдингов, озабоченные текущими задачами, не до конца осознают силу и возможности интеллектуальных решений, и, в лучшем случае, соглашаются на проекты облета полей беспилотниками и разработкой "Планшетов агронома", решающих конкретные агротехнические и агрономические задачи в формате "здесь и сейчас".

Однако, возникающие в современном сельском хозяйстве проблемы уже нельзя решать традиционными методами. Ярким примером является так называемое «точное (прецизионное) земледелие» (precision agriculture), являющееся одном из основных элементов ресурсосберегающих технологий в сельском хозяйстве. Точное земледелие позволяет управлять продуктивностью посевов с учётом внутрипольной вариабельности среды обитания растений. Подчеркнем, что при решении таких задач необходима очень высокая сантиметровая планово-высотная точность полей с ежегодной повторяемостью результатов (в плане - до 1 см, по высоте до 5 см). Применительно к задачам точного земледелия к агротехническим средствам предъявляются следующие основные требования: точность позиционирования - не хуже 20 см, скорость движения - не менее 15-20 км/час, функционирование в формате 24*7*365, возможность беспроводной связи, минимальное воздействие на почву.

К «умному» сельскому хозяйству аналитики относят следующие составляющие

1. Беспилотные транспортные средства в интресах автоматизации автоматизировать всю сельскохозяйственную деятельность: обработка земель, слежение за здоровьем растений, сбор/хранение урожая
2. Беспилотные летательные аппараты, оснащенные камерами и высокочувствительными сенсорами для создания электронные карты полей в формате 3D, рассчитывать показатель Normalized Difference Vegetation Index (нормализованный вегетационный индекс) с целью эффективного удобрения культур, инвентаризировать проводимые работы, охранять сельхозугодия и т.д.
3. Датчики и сенсоры, в том числе передающие по радиоканалам информацию о состоянии контролируемых объектов, в частности, значение таких параметров, как: влажность воздуха и листьев, температура, показывающие неоднородность почвы, уровень радиации, и т.д. Сюда же относятся и навигационные датчики ГЛОНАСС/GPS для обеспечения точности, прежде всего маршрутов движения сельхозтехники.
4. Платформы интернета вещей для сельского хозяйства. По существу речь снова идет о датчиках, которые связываются между собой в сложные, взаимодействующие сети с обработкой собранных с помощью сенсоров данные (большие данные).

Авторы настоящей работы, не претендуя на всеобщность, попытались осмыслить требования, которые может и предъявляет практика в робототехническим средствам в интересах решения сельскохозяйственных задач, прежде всего точного земледелия.

Прежде всего, выделим основные проблемы точного земледелия, связанные с использованием робототехнических устройств.

Учет всех источников информации и всей априорной информации

Принципиально сельское хозяйство в настоящее время несколько отличается от других сфер экономики сравнительно малым количеством датчиков. Несомненно, датчики, предоставляющие информацию о погоде, влажности и др. объективных показателей важны; но еще более важным является их объединения в понятную и эффективную сеть и другой информацией, получаемой как в режиме on-line так и off-line. Можно говорить о том, что специалист-агроном, планируя работы на поле, должен быть полностью "ситуационно осведомлен". Применяя в сфере сельского хозяйства идеологию ситуационной осведомленности по модели Endsley [1], введем новое понятие «полевая ситуационная осведомленность», в котором, с учетом концепций точного земледелия, можно выделять три основных понятийно-образующих элемента:

– информация об окружающей ситуации среды обитания растений, складывающейся в данной области поля, в пространстве и времени;

– распознавание и понимание складывающейся ситуации среды обитания растений для ее отнесения к классу или к прецеденту, по которым уже известны как принятые решения, так и их последствия;

– прогнозирование сценария развития ситуации среды обитания растений, собственных действий и действий других участников сельскохозяйственного процесса.

В правильно построенной агросистеме по мере развития происходит постепенное накопление опыта и знаний полевой ситуационной осведомленности, в котором участвуют все элементы системы.

Необходимо разделять ресурс "полевая ситуационная осведомленность" и базу данных сельхозпредприятия. В нашей концепции это информационные ресурсы, которые разделяются по статусу и обновляемости информации. Ресурс "полевая ситуационная осведомленность" содержит динамическую информацию текущей ситуации на поле для динамического мониторинга, электронную карту поля в формате on-line, обновляется ежедневно с использованием информации датчиков полей, технических средств, работающих на полях, агрономов и др. База данных сельхозпредприятия содержит статическую информацию, обновляется дважды в год (начало и конец полевого сезона) и содержит информацию для планирования сельскохозяйственных операций, урожайности полей, информацию о клиентах, технологические карты, поставках, продажах и др., формирование необходимых отчетов.

Распознавание проблемного места в пространстве (на поле)

Основной объективной особенностью современного земледелия является вариабельность и неравномерность распределения по площади. В качестве объектов такого распределения могут выступать и сами посевы, и вредители, и сорняки и др. элементы среды обитания растений. В конечном итоге, задача заключается в создании электронных карт пригодности полей, что рассматривается как одна из важнейших комплексных задач точного земледелия. Такие карты предназначены для аккумулирования и классификации информации по севообороту, урожайности, типам почв, болезням, вносимым удобрениям и средствам защиты растений. Вместе с тем, многие существующие предлагаемые решения основываются на использовании либо космических снимков высокого разрешения, либо, для повышения точности, пилотируемой малой авиации и беспилотной авиационной техники. Однако вариабельность полей может быть столь значительной, что такие карты лишь позволят определить некоторые значимые проблемные области. Уточнение ситуации внутри этих проблемных областей возможно лишь с использованием специальных систем распознавания. Но именно здесь и начинаются основные технические проблемы - вес таких систем не позволяет их массово использовать в качестве полезной нагрузки беспилотных летательных аппаратов. Кроме того, нельзя не учитывать экономику. По предварительной информации один «дроновылет» продолжительностью до 45 минут имеет стоимость свыше 2000 руб.

Почвенно-экологический агрохимический анализ почв

Такой анализ является ценнейшим источником объективной информации о структуре почв. Изучение рынка показывает, что для агрохозяйств важно не только агрохимическое исследование почвы, но также и постоянное наблюдение и контроль за изменением в составе и функциях почв, за динамикой природных процессов и средообразующих компонентов почвенного покрова. Здесь необходим контроль за наиболее уязвимыми свойствами почв, изменение которых может вызвать потерю плодородия, ухудшение качества растительной продукции, деградацию почвенного покрова, постоянный контроль над важнейшими показателями почвенного плодородия, ранняя диагностика негативных изменений почвенных свойств, контроль за сезонной динамикой почвенных процессов с целью прогноза ожидаемых урожаев и оперативного регулирования развития сельскохозяйственных культур, изменением свойств почв при длительных антропогенных нагрузках и др.

С технической и организационной точки зрения необходимо взятия проб почвы с высокой привязкой к месту и времени взятия почвы. При этом существуют многочисленные требования к процессу взятия проб – санитарные, технические (по глубине забора проб, массе пробы, местам ее взятия и др.). В настоящее время преимущественным способом является ручной взятие проб. Понятно, что автоматизация этого процесса необходима и физически возможна лишь решением технических задач на месте, то есть на земле.

Разработка моделей развития ситуаций среды обитания растений

В прямой постановке указанные модели не относятся к робототехнике, но именно они реализуются в общем программном обеспечении, поддерживая принятие решения в едином процессе. Наше исследование, однако, показало, что это направление является едва ли не самым сложным. Прогноз основывается на изучении связи развития и распространения вредителей и болезней с факторами окружающей среды. Существенная проблема заключается и в том, что эти модели не универсальны, но для различных видов растений и вредителей (число которых исчисляется сотнями) весьма индивидуальны. К сожалению, методы составления прогнозов болезней, особенно болезней в городских условиях, разработаны очень слабо. Насекомые в городских посадках также ведут себя по-иному по сравнению с лесными биоценозами. Большую часть моделей с учетом этих особенностей еще предстоит разработать.

Физическое решение задач точного земледелия

Несмотря на появление в последнее время беспилотной техники, основным средство решения задач точного земледелия по-прежнему остаются наземные средства. Это означает, что именно они будут являться носителями навесного оборудования нового типа, которое будет совмещено с программным обеспечением, рассчитывающим соответствующие характеристики (дозы) средств, воздействующих на среду обитания растений.

Таким образом, будущее робототехническое средство, решающее задачи в интересах точного земледелия, должно удовлетворять следующим требованиям.

– Иметь высокую точность позиционирования (не хуже 10-20 см).

– Формировать и корректировать с помощью Оператора (или самостоятельно) маршрут движения.

– Иметь сравнительно высокую скорость движения (не менее 15-20 км/час).

– Иметь запас топлива (хода) не менее чем на 5-6 часов автономного функционирования.

– Быть работоспособным в формате 24*7*365 (при необходимости).

– Иметь систему управления, интегрированную по сервисной модели:

- с сервисами с базой знаний сельхозпредприятия и участвовать в создании и пополнении этой базы знаний данными и знаниями;
- с ресурсом «полевая ситуационная осведомленность», пополняя и используя указанный ресурс;
- с моделями прогноза ситуаций, возникающих в среде обитания растений.

– Иметь беспроводную связь с оператором, дистанционно им управляемым, а при отсутствии связи функционировать автономно до восстановления связи.

– Оказывать минимальное воздействие на почву.

– Иметь возможность брать и анализировать в режиме on-line/off-line пробы грунта с высокой производительностью отбора проб.

– Иметь систему технического зрения, для движения в сложных геофизических условиях.

– Реализовывать решение задач распознавания ситуаций, возникающих в среде обитания растений, с отнесением ситуаций к определенному классу.

– Иметь возможность установки разнообразного навесного оборудования для решения задач точного земледелия (дифференцированное внесение удобрений, борьба с сорняками, вредителями и др.).

– Быть легко ремонтопригодным.

– Обслуживаться минимальным количеством специалистов.

– Иметь возможность функционирования в составе группы себе подобных устройств, занимая различные роли.

Достаточно универсальным техническим решением, реализующим в различной мере указанные выше свойства, могут стать небольшие по размерам гусеничные агророботы, обладающие набором интеллектуальных функций и позволяющие решать проблемы «точного» земледелия под ключ.

Рассмотрим возможное схемно-архитектурное решение такого робота (см. рис 1.)

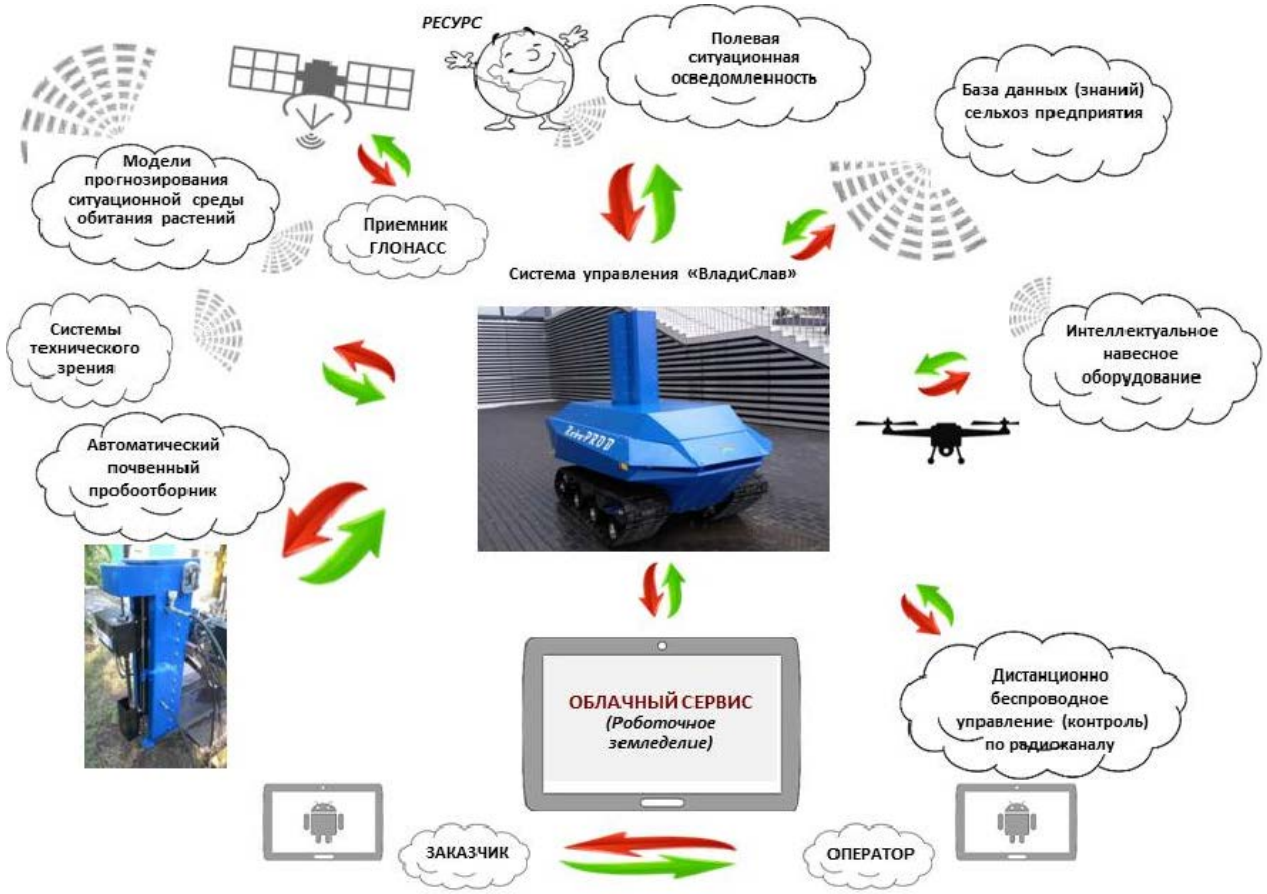


Рисунок 1 – Интеллектуальный агроробот «ВладиСлав»

Агроробот с условным названием «ВладиСлав» представляет собой дистанционно-управляемую по радиоканалу интеллектуальную платформу на гусеничном ходу. Вес платформы без оборудования - около 100 кг, с оборудованием – не более 125 кг.

На платформе установлена антенна радиоуправления, автоматический пробоотборник, интеллектуальное навесное оборудование для дифференцированного внесения удобрений и иных необходимых действий, 2G/3G модем системы ГЛОНАСС для обеспечения навигации, система технического зрения для безопасного движения и обхода препятствий, подвижная с диапазоном до 270 град по азимуту и 75 град по углу места система фото-видеофиксации для получения фото-видео образов ситуаций (растений, сорняков, вредителей и др.). Инновационным элементом является установка на агроробота беспилотного летательного аппарата, оснащенного видео и фото камерами высокого разрешения для дистанционных исследований, производства работ по разведке местности, контроля решения задач агророботом.

Управление Агророботом осуществляется либо Оператором по радиоканалу либо (при потере связи) автономно по программе, заложенной в память системы управления агроробота и его автопилота с использованием спутниковой навигационной системы ГЛОНАСС. Предусматривается три основных режима а) дистанционный - дистанционное управление агророботом специально обученным Оператором по радиоканалу б)автономное управление по программам, рассчитываемым заблаговременно и в) полуавтономный- функционирование осуществляется в автономном режиме при возможности вмешивания Оператора в работу Агроробота и корректировки маршрута по дополнительной поступающей информации о ситуации.

Автоматизированное рабочее место Оператора реализуется на базе персонального переносного компьютера. На нем устанавливается Интернет Портал Агроробота, содержащий меню задач и сервисы Агроробота; на нем отображается контролируемая текущая ситуация, через него осуществляется управления, на Оператора же возлагается функция подготовки Отчета Заказчику.

Задание роботу формируется через специальный облачный сервис «Роботочное земледелие». Через него Заказчик обращается к специализированному интернет-порталу, в котором может выбрать

по меню интересующий его сервис Агроробота. Оператор обрабатывает заявку, планирует ее выполнение, определяет наличие ресурсов, оценивает его реализуемость и возможность ее выполнения в заданное время, составляет, обсуждает и утверждает у Заказчика План всей миссии.

В Интернете заблаговременно для каждого агропредприятия формируется специальный облачный ресурс "полевая ситуационная осведомленность", содержащий сведения об истории обрабатываемого участка пашни, текущем агрохимическом составе почвы, данных о применяемых агротехнологиях, особенностях планируемой к посеву культуры и др. Математическая модель облака ситуационной осведомленности разрабатывается как типовая база знаний с продукционными правилами вывода. Система представления и извлечения знаний робота заключается в том, что он с помощью собственных систем технического зрения, системы фото-видеофиксации состояния среды, системы наблюдения беспилотника может добывать и "выкладывать" в облако ситуационной осведомленности необходимую для решения задач информацию, а также запрашивать из облака необходимые данные путем специально организованных запросов-протоколов.

Решение всех задач Агророботом и в перспективе другими, связанными с задачами Агроробота робототехническими и организационными системами, реализуется посредством оркестровки и и хореографии сервисов систем в рамках сервисно-ориентированной архитектуры. Рассматривая План миссии в качестве исходного, Оператор с использованием специального ПО формирует План выполнения задач Агророботом и Маршрут движения, которые и реализуют миссию в виде последовательности процессов-задач-сервисов.

Задачи разработки наземного маршрута Агроробота сельхозугодий и полетного задания беспилотнику ставятся как задачи маршрутизации. Для формирования маршрутов в системы управления объектов закладывается муравьиный алгоритм [2], позволяющий эффективно и субоптимально определить маршрут, причем с учетом необходимости замены точек обхода и изменения порядка обхода в процессе on-line.

Предполагается, что в среднесрочной перспективе в качестве одной из инновационных функций агроробота будет собственное проектирование Плана решения задач или производства определенных работ, описанных Заказчиком в общем виде. Для обучения и создания соответствующих алгоритмов в настоящее время разрабатывается специальный модуль прогноза и поиска решения на основе нейронной модели с ансамблевой организацией.

На первом этапе создания Агроробота «ВладиСлав» предусматриваются возможность задания и выполнения следующих пяти миссий.

1. Миссия «РобоПроба». В этой миссии решаются задачи взятия и on-line/off-line проб почвы на заданном участке местности.

2. Миссия «БПЛА-NDVI». В этой миссии Агроробот и базирующийся на нем БПЛА действуют совместно для решения задач определения NDVI на заданных участках поля и построения электронной карты местности.

3. Миссия «Распознавание ситуации». В этой миссии Агроробот, работая по заданному сценарию, с использованием алгоритмов распознавания образов определяет уровень проблемности участка сельскохозяйственного поля по направлениям: общая характеристика ситуации с растениями, болезни растений, наличие и тип сорняков, наличие и тип вредителей.

4. Миссия «Робо-удобрения». В этой миссии с помощью специального ПО по данным о текущей ситуации определяется доза дифференцированного внесения удобрений на заданный участок местности, которая вносится с использованием навесного оборудования.

5. Миссия «РобоДоктор». В настоящий момент эта миссия подразумевает вмешательство в среду обитания растений с целью исправления негативных последствий ситуаций, связанных с ростом различного типа сорняков, наличием вредителей, болезнями растений. Реализацию миссии планируется осуществлять также с использованием специального навесного оборудования. Однако алгоритмы решения этих задач с настоящее время еще находятся в стадии осмысления.

Большая часть перечисленных функций разрабатываемого Агроробота так или иначе связаны с постановками и методами решения задач интеллектуального управления, в перспективе решаемых полностью в автоматическом режиме (на Оператора мы возлагаем только задачи контроля функционирования устройства). Указанное образует интеллектуальную составляющую робота, что позволяет рассматривать его как интеллектуального агента в смысле [3].

Предполагается, что Агроробот функционирует не отдельно, а в информационно-коммуникационной среде других агротехнических устройств и задач сельскохозяйственного предприятия. Поэтому все функции Агроробота представляются в виде информационных и активных сервисов, что позволяет реализовать сервисные модели их востребованности и использования.

1. Endsley M.R. Toward a theory of situation awareness in dynamic systems // Human Factors. 1995, Vol. 37. № 1. P. 32—64.
2. Абросимов В.К. Коллективы интеллектуальных летательных аппаратов: монография. - М.: Издательский Дом «Наука», 2017. -304с.
3. Городецкий В.И., Грушинский М.С., Хабалов А.В. Многоагентные системы (обзор) [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://spkurdyumov.ru/networks/mnogoagentnye-sistemy-obzor/

S.M. Shpolyanskiy, A.Y. Sedov

CONSTRUCTIVE FEATURES OF THE THROWABLE CRAWLER ROBOTIC PLATFORMS

Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics, Saint-Petersburg
s.shpolyanskiy@rtc.ru, a.sedov@rtc.ru

Abstract

The paper deals with the main problems arising from the operation of small size throwable robotic platforms, which must be taken into account in the design process of such type of equipment.

Key words: robotic platform, throwable robot.

С.М. Шполянский, А.Ю. Седов

КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ЗАБРАСЫВАЕМЫХ ГУСЕНИЧНЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ ПЛАТФОРМ

ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург
s.shpolyanskiy@rtc.ru, a.sedov@rtc.ru

Аннотация

В статье рассмотрены основные проблемы, возникающие в результате эксплуатации и использования малогабаритных забрасываемых робототехнических платформ, которые необходимо учитывать в процессе создания такого типа техники.

Ключевые слова: робототехническая платформа, забрасываемый робот.

Введение

В настоящее время мобильные робототехнические платформы активно используются для сбора информации в труднодоступных или опасных для человека средах, – их применение позволяет обеспечить возможность инспекции завалов в результате техногенных или геологических катастроф. Для роботов такого типа критически важно реализовать оперативную, простую и безопасную доставку, например, путем забрасывания в здание через оконный проем или сброса с беспилотного летательного аппарата в область, которую необходимо инспектировать.

На сегодняшний день среди наиболее популярных забрасываемых малогабаритных робототехнических платформ (МРП), которые используются в различных силовых и гражданских структурах, можно отметить следующие:

– МРП 110 First Look производства компании iRobot, США;

– МРП Eyedrive производства компании ODF Optronics, Израиль;

– МРП Armadillo производства компании MacroUSA, США.

Несмотря на ряд преимуществ, область применения данных устройств существенно ограничена в силу их геометрии и конструктивных особенностей и, как следствие, проходимостью. Кроме того, массогабаритные характеристики указанных МРП ограничивают дальность и высоту забрасывания.

Таким образом, все еще не решенной задачей остается создание легкого забрасываемого робота повышенной проходимости.

Обзор забрасываемых малогабаритных робототехнических платформ

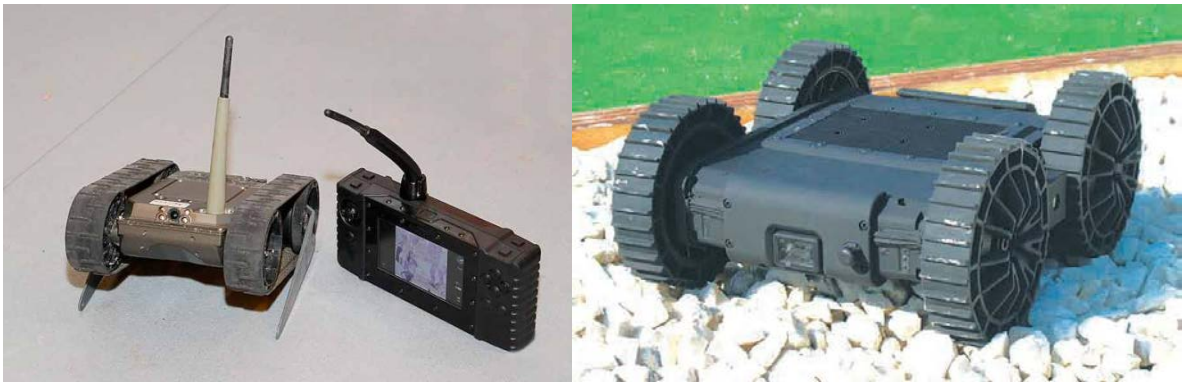
1. МРП 110 First Look производства компании iRobot, США [1-3]

Внешний вид робота представлен на рис. 1 а). МРП 110 First Look предназначена для использования в ходе военных операций (при проведении зачистки зданий, инспектирования небольших помещений, тоннелей, окопов или дренажных штолен), в случае необходимости МРП может быть заброшена оператором, например, в окно, проем или на крышу, где автоматически принимает исходное положение для ведения наблюдения.

2. МРП Armadillo производства компании MacroUSA, США [3-4]

Внешний вид робота представлен на рис. 1 б). Модификации Armadillo V3.5 и Armadillo V4.0 имеют массу 3,13 кг и 3,70 кг соответственно. МРП способны выдержать падение с высоты до 2,5 м или горизонтальный полет дальностью 8 м. Оба варианта оборудованы планками Пикатинни для установки различных датчиков и дополнительных устройств (манипулятора, тепловизора и др.) общей массой до 3 кг. Модификация Armadillo V3.5 имеет габаритные размеры 295 х 270 мм; Armadillo V4.0 – 320 х 265 мм. Оба робота оборудованы микрофоном и опциональной системой GPS.

Система управления МРП Armadillo имеет радиус действия в прямой видимости до 300 м (в непрямой видимости – 200 м). Резиновые колеса диаметром 130 мм позволяют роботам Armadillo преодолевать уклоны в 45°. В дополнение на них может устанавливаться комплект для преодоления ступеней, который включает рычаги и резиновые гусеницы вместо колес. Максимальная скорость передвижения – 3 км/ч, заряда батарей хватает на 3,5 ч автономной работы.



а) б)

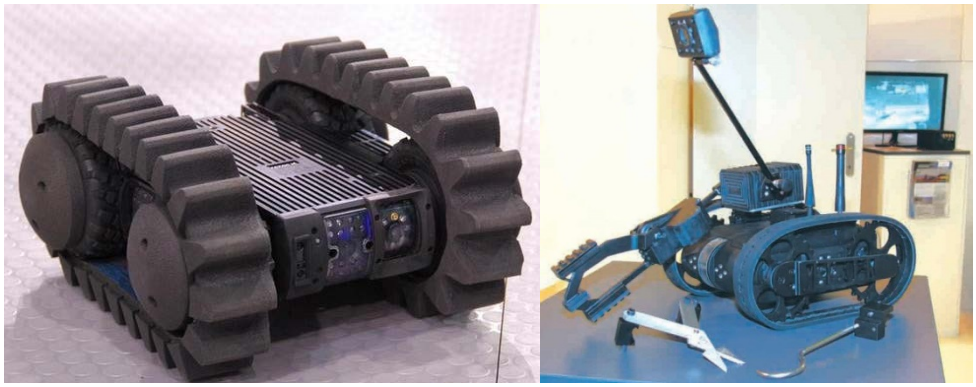
Рисунок 1 – Забрасываемые малогабаритные робототехнические платформы
а) МРП 110 First Look; б) МРП Armadillo

3. МРП Eyedrive производства компании ODF Optronics, Израиль [5-7]

Внешний вид робота представлен на рис. 2 а). МРП Eye Drive – это разработка специального назначения для ведения разведывательных и антитеррористических операций. Кроме того, применение робота возможно при поиске пострадавших во время стихийных бедствий. Изделие представляет собой радиоуправляемый четырехколесную платформу, на колеса которой могут быть надеты гусеницы. МРП Eye Drive снабжена небольшим кузовом, электроникой управления, модулем связи, аккумулятором питания, электродвигателем, четырьмя стационарными и одной поворотной видеокамерами. Небольшие массогабаритные размеры робота позволяют легко забросить его в потенциально исследуемое помещение, не подвергая опасности людей.

4. МРП NovaSRR производства компании Novatiq, Швейцария [3, 8]

Внешний вид робота представлен на рис. 2 б). МРП NovaSRR имеет гусеничное и полноприводное 4 х 4 колесное шасси, может развивать скорость до 10 км/ч. Гусеничное шасси робота способно выдержать падение с высоты 3 м и бросок дальностью до 5 м. Для колесного аналога эти показатели составляют 4 м и 6 м соответственно. МРП оснащена фронтальной камерой с электроприводом наклона и имеет светодиоды белого и инфракрасного света. Полезные нагрузки массой до 2,5 кг могут устанавливаться на планку Пикатинни.



а) б)

Рисунок 2 – Забрасываемые малогабаритные робототехнические платформы
а) МРП Eyedrive; б) МРП NovaSRR

5. МРП «Кадет» производства ЦНИИ РТК, Россия [9]

Внешний вид робота представлен на рис. 3. МРП «Кадет» предназначена для проведения дистанционного аудио-видео наблюдения в условиях городской и промышленной инфраструктуры и доставки полезной нагрузки.

Основные тактико-технические характеристики рассмотренных платформ приведены в табл. 1.

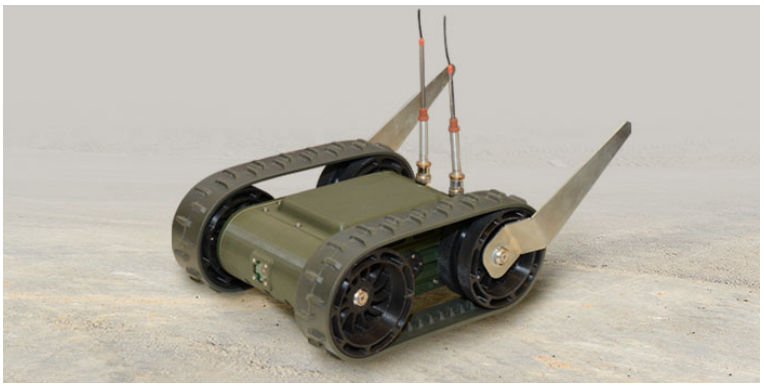


Рисунок 3 – Малогабаритная робототехническая платформа «Кадет»

Таблица 1. Тактико-технические характеристики малогабаритных робототехнических платформ

Модель МРП	**110 First Look**	**Armadillo**	**Eyedrive**	**NovaSRR**	**Кадет**
Масса, кг	2,4	3,7	3	4,5	3
Габаритные размеры, мм	250 x 230 x 100	295 x 270	280 x 250 x 110	-	250 x 215 x 90
Максимальная скорость, м/с	1,5	0,8	2,7	2,7	1
Шасси	гусеничное	гусеничное, колесное	гусеничное, колесное	гусеничное	гусеничное
Максимальная высота падения, м	4,5	2,5	3	2,5	1,5
Дальность связи, м	200	300	300	200	200
Время работы, ч	6	3,5	3	-	2

Оценочный расчет силы удара

Для определения сил, действующих на платформу при падении, необходимо осуществить оценочный расчет силы удара. Значения основных характеристик платформы, используемых в расчетах, представлены в табл. 2.

Таблица 2. Используемые значения характеристик платформы

Характеристика платформы	**Значение**
Максимальная высота падения на твердую поверхность при сохранении работоспособности – h, м	5
Масса – m, кг	2,5
Габаритные размеры, Д х Ш х В, мм	250 х 215 х 90
Диаметр катка гусеничного движителя, мм	90

1. Расчет конечной скорости платформы при падении с высоты 5 м

Рассмотрим схему расчетов скорости, представленную на рис. 4 (слева), и в соответствии с законом сохранения энергии рассчитаем конечную скорость падения робота:

$$mgh = \frac{mv^2}{2} \tag{1}$$
$$\Rightarrow\ v = \sqrt{2gh} = 10\text{м/с}.$$

2. Расчет времени удара

В первом приближении, при условии падения платформы на гусеничный каток, расчетная система представима как колебательный контур (груз на пружине), т.к. время удара равно времени сжатия материала гусеничного катка. Расчетная система в момент удара представима в виде преобразования кинетической энергии в энергию сжатия пружины.

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{cx^2}{2}, \tag{2}$$

где x – деформация гусеничного катка, м.

Подставляя (1) в (2), имеем:

$$c = \frac{2ghm}{x^2}, \tag{3}$$
$$T = 2\pi\sqrt{m/c}. \tag{4}$$

Согласно рис. 4 (справа), время падения равно 1/4 периода колебания:

$$t_1 = \frac{1}{4}T. \tag{5}$$

Подставим (3) в (4) и используем полученное равенство в (5), и при условии, что половина энергии удара погашена катком, вычисляем время удара:

$$t_1 = \frac{1}{2}\pi x\sqrt{\frac{1}{2gh}} = 0{,}005\text{ с}.$$

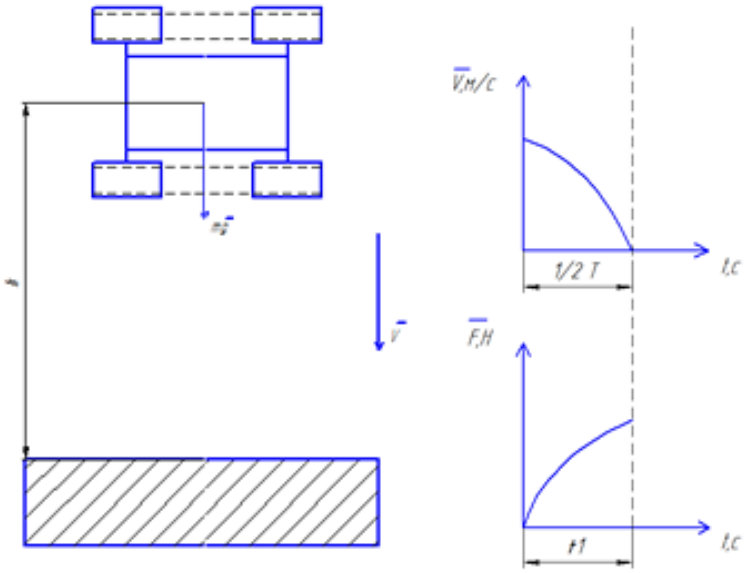


Рисунок 4 – Схема расчета скорости (слева); график нагрузки (справа)

3. Расчет силы удара

Используя второй закон Ньютона:

$$m\frac{dv}{dt} = F, \tag{6}$$

проинтегрируем (6):

$$\int_0^v mdv = \int_0^{t1} Fdt,$$

получим формулу расчета силы удара и, подставив значения, найдем усилие:

$$F = \frac{mv}{t_1} = \frac{2{,}5 \cdot 10}{0{,}005} = 5 \text{ кН}.$$

Определение наиболее опасных падений робота

Для определения изгибающих моментов на валах рассмотрены наиболее опасные варианты падения платформы. Уравнение изгибающего и вращательного момента гусеничного катка имеет вид:

$$M = Fl, \tag{7}$$
$$M = Fr. \tag{8}$$

1. Радиальное направление действия силы удара на один гусеничный каток при горизонтальном расположении платформы

Рассмотрим рис. 5. Зная силу удара и длину плеча $l = 107{,}5$ мм, согласно (7) вычислим момент, возникающий на валу в результате падения:

$$M = 540 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

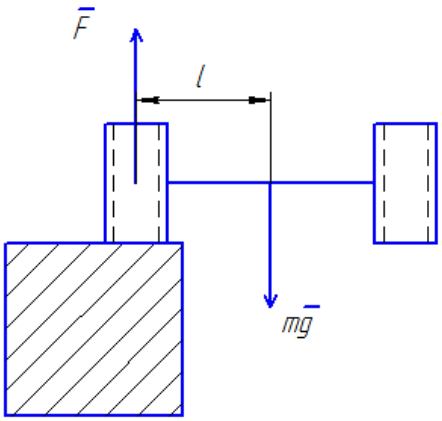


Рисунок 5 – Радиальное направление действия силы удара на один гусеничный каток при горизонтальном расположении платформы

2. Радиальное направление действие силы удара на один гусеничный каток при вертикальном расположении платформы

Рассмотрим рис. 6. Зная силу удара и длину плеча $l = 107{,}5$ мм, согласно (7) вычислим момент, возникающий на валу в результате падения:

$$M = 540 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

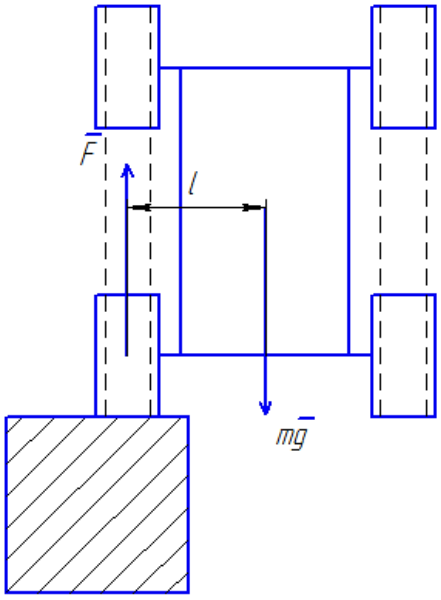


Рисунок 6 – Радиальное направление действия силы удара на один гусеничный каток при вертикальном расположении платформы

3. Осевое направление действие силы удара на один гусеничный каток

Рассмотрим рис. 7. Зная силу удара и длину плеча $l = 107{,}5$ мм, согласно (7) вычислим момент, возникающий на валу в результате падения:

$$M = 625 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

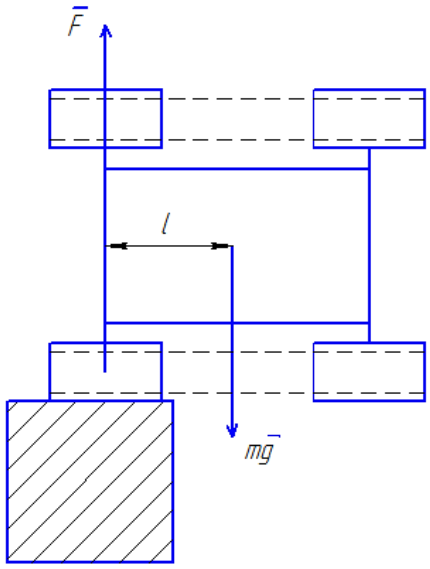


Рисунок 7 – Осевое направление действия силы удара на один гусеничный каток

4. Падение под углом 45° к горизонту

Согласно рис. 8, когда платформа поднимается на максимальную высоту h, вертикальная составляющая скорости равна нулю. Используя закон сохранения энергии, вычислим конечную скорость падения робота:

$$v_x = v \cdot \cos\alpha, \tag{9}$$

$$\frac{mv_x{}^2}{2} + mgh = \frac{mv_1^2}{2}, \tag{10}$$

здесь начальная скорость (скорость броска) $v = 10$м/с.

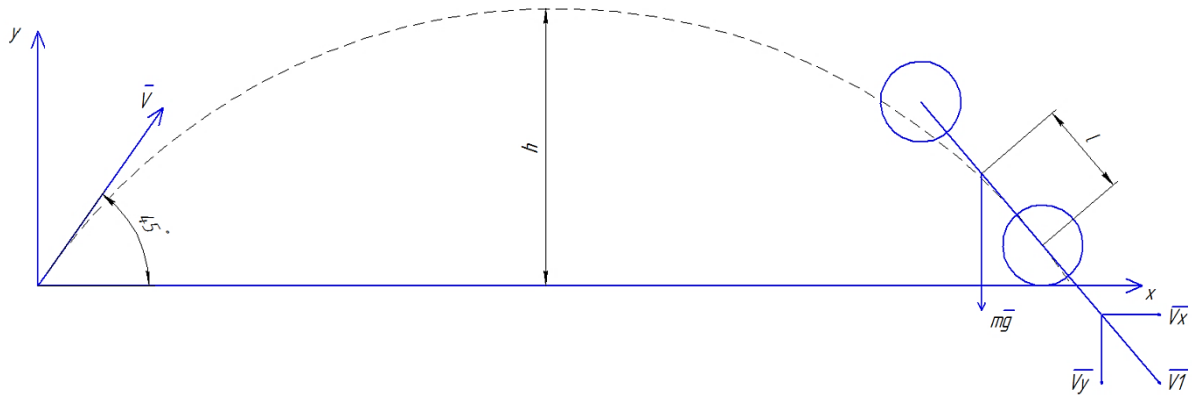


Рисунок 8 – Падение под углом 45° к горизонту

Подставим (9) в (10):

$$\frac{mv^2(\cos\alpha)^2}{2} + mgh = \frac{mv_1^2}{2},$$

и подставив значения, вычислим конечную скорость падения робота:

$$v_1 = \sqrt{v^2(\cos\alpha)^2 + 2gh} = 12{,}2 \text{ м/с}.$$

Согласно (6) найдем силу удара платформы о поверхность:

$$F = 6 \text{ кН}.$$

Наконец, при радиусе колеса $r = 45$ мм, согласно (8) вычислим момент, возникающий на колесе в результате падения:

$$M = 270 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Вращающий момент, возникающий на колесе при падении, более чем в 200 раз превышает максимально допустимый момент на приводе колеса, что приводит к необходимости применения защитных элементов (таких, как например, фрикционные муфты), которые предотвращали бы разрушения. Помимо предохранительных систем привода необходимо применение элементов демпфирования осевых нагрузок. Катки гусеничного привода целесообразно выполнять из упругих материалов с элементами внутренней амортизации. Силовой каркас шасси необходимо выполнять из легких материалов с высокой жесткостью с целью снижения взаимного перемещения внутренних элементов конструкции.

Кинематическая схема

По результатам расчетов и анализа опасных падений робота предложена следующая кинематическая схема платформы (см. рис. 9).

Перемотка левой гусеничной ленты осуществляется валом (III), опирающимся на подшипник скольжения, через фрикционную дисковую муфту (7) мотор-редуктором (1). Перемотка правой гусеничной ленты осуществляется аналогично левой. Поворот рычагов (9), (10) осуществляется валом (V), опирающимся на два радиальных подшипника, на котором расположено червячное колесо (5), находящееся в зацеплении с червяком (6), вращение которому сообщается мотор-редуктором (3) через упругую муфту (4).

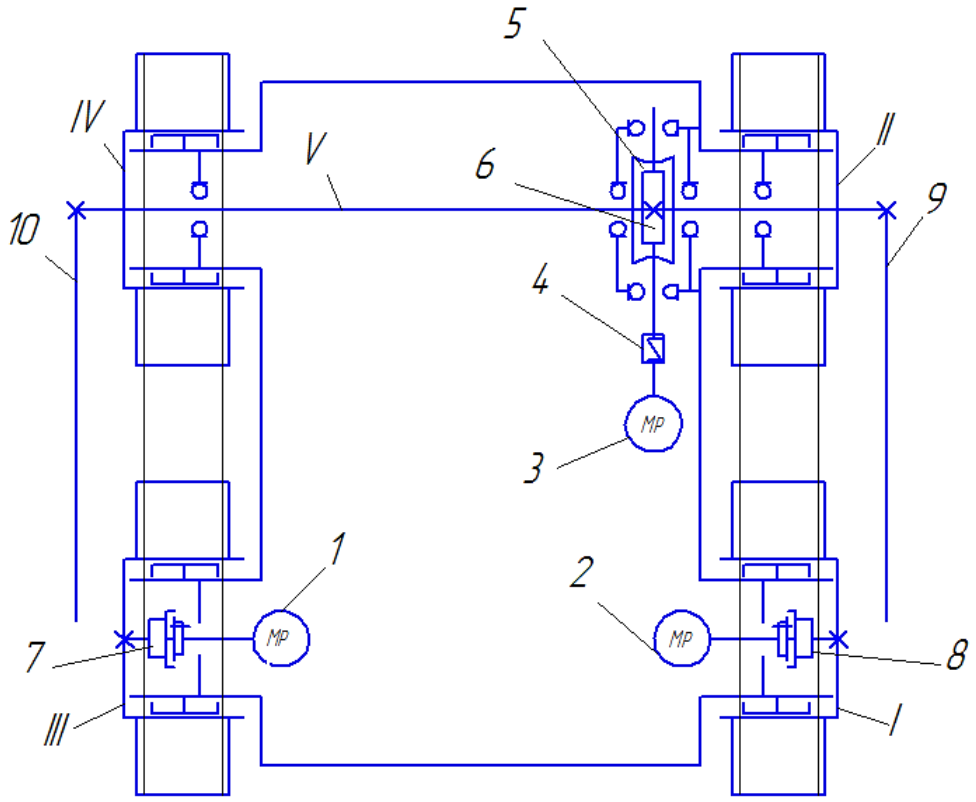


Рисунок 9 – Кинематическая схема

Заключение

При определении конструктивных особенностей рассмотрен ряд образцов забрасываемых гусеничных платформ. Определены ключевые технические характеристики. Проведены оценочные расчеты нагрузок, действующих на шасси в момент падения. Подтверждена необходимость

применения предохранительных элементов приводов и защитных элементов демпфирования ударных нагрузок. Предложена кинематическая схема шасси с учетом конструктивных особенностей.

В дальнейшем планируется создание модели платформы и подбор наиболее подходящих конструктивных материалов.

1. Официальный сайт производителя. – Режим доступа: https://irobot.ru/about
2. Лапшов В.С., Носков В.П., Рубцов И.В. Опыт создания автономных мобильных робототехнических комплексов специального назначения // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. «Специальная робототехника и мехатроника». – 2011.
3. Наземные роботы. От забрасываемых систем до безлюдных транспортных колонн [Электронный ресурс]. – URL: https://topwar.ru/66967-nazemnye-robotyot-zabrasyvaemyh-sistem-do-bezlyudnyh-transportnyh-kolonn-chast-1.html
4. Официальный сайт производителя. – Режим доступа: https://www.army-technology.com/contractors/mines/novatiq
5. Eye Drive – Мини-робот с дистанционным управлением [Электронный ресурс]. – URL: http://ohrana.ru/equipment/technique/2987
6. Официальный сайт производителя. – Режим доступа: http://www.mistralsecurityinc.com/Our-Products/Tactical-Equipment/EyeDrive
7. И.В Рубцов. Вопросы состояния и перспективы развития отечественной наземной робототехники военного и специального назначения // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013.
8. Интернет-энциклопедия. – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org
9. Официальный сайт ЦНИИ РТК [Электронный ресурс]. – URL: http://www.rtc.ru/ru/nazemnaya-robototekhnika/kadet

A.N. Vlasenko, A.Y. Ivasheva, O.E. Lapin, V.G. Mikutsky, P.V. Semenikhin

SYSTEM FOR AUTONOMOUS RADIATION MONITORING AROUND NUCLEAR POWER PLANT

Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics, Saint-Petersburg
p.semenihin@rtc.ru

Abstract

The concept of a system for radiation monitoring of the territory of nuclear power plants is proposed. The main potentially hazardous facilities located on the territory of the nuclear power plant are described. The analysis of the current state of the market of unmanned aerial vehicles and gamma-ray detectors is carried out. The work is consistent with the " Concept of long-term social and economic development until 2020".

Key words: radiation monitoring, gamma radiation, gamma radiation detectors, scintillators, unmanned aerial vehicles, UAV, nuclear power plants.

А.Н. Власенко, А.Ю. Ивашева, О.Е. Лапин, В.Г. Микуцкий, П.В. Семенихин

СИСТЕМА ДЛЯ АВТОНОМНОГО МОНИТОРИНГА РАДИАЦИОННОЙ ОБСТАНОВКИ ВОКРУГ АТОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург
p.semenihin@rtc.ru

Аннотация

В статье предложена концепция системы для проведения радиационного мониторинга на территории АЭС. Представлено описание основных потенциально опасных объектов, находящихся на территории АЭС. Проведен анализ современного состояния рынка беспилотных летательных аппаратов и детекторов гамма-излучения. Работа согласуется с «Концепцией долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2020 года».

Ключевые слова: радиационный мониторинг, гамма-излучение, детекторы гамма-излучения, сцинтилляторы, беспилотные летательные аппараты, БПЛА, БЛА, атомные электростанции, АЭС.

Введение

Атомные электростанций (АЭС) являются одними из наиболее оптимальных способов получения электроэнергии, несмотря на последние достижения науки в области поиска альтернативных источников энергии. Атомная энергетика обладает следующими достоинствами: высокой экономической эффективностью и большой мощностью, абсолютной независимостью выдаваемой мощности от климатических условий, экологичностью, при соблюдении условий правильного использования. В подтверждение экономической выгоды атомной энергетики можно сказать, что на данный момент в мире эксплуатируется 192 АЭС в тридцати одной стране, с общей выработкой электрической мощности около 400 ГВт [1]. На территории России функционируют десять атомных электростанций. За последние пять лет доля атомной энергетики в общем энергобалансе России стабильно растёт, на конец 2017 года она составляет 19,3 %. В 2017 году был установлен абсолютный рекорд совокупной выработки энергии – 202,868 млрд кВт.ч на АЭС России [2]. При этом в разработках проекта Энергетической стратегии России на период до 2030 г. предусмотрено увеличение производства электроэнергии на атомных электростанциях в 4 раза [3].

В соответствии с «Концепцией долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2020 года» к числу актуальных направлений развития страны относится обеспечение радиационной безопасности населения и окружающей среды [4]. В связи с этим, возникает необходимость постоянного совершенствования систем мониторинга радиационной обстановки на территории АЭС, а так же во время мероприятий по транспортировке отработавшего ядерного топлива.

АЭС является технологическим сложным объектом, помимо непосредственно самого энергоблока источниками радиационной опасности являются: бассейны выдержки отработанного топлива, хранилища радиоактивных отходов, и специальные могильники, располагающиеся на территории АЭС. Также следует отметить возможность выброса радиоактивных аэрозолей, которые возникают даже в условиях штатной работы АЭС.

В случае радиационных аварий беспилотные летательные аппараты (БПЛА) являются практически единственным способом для проведения мониторинга радиационной обстановки, ввиду возникающих высоких значений мощности дозы излучения (МЭД), об этом свидетельствует большой опыт их применения [5-11]. Но при этом, существует необходимость проведения постоянного мониторинга работоспособности АЭС: определение уровней возникающих течей и выбросов, а так же контроль за перемещением ядерных материалов по территории АЭС [12].

В отличие от систем предназначенных для работы в случае аварийных ситуаций [13], системы для мониторинга радиационной обстановки в условиях штатной работы АЭС должны обладать рядом отличительных особенностей. Так как их работа производится при уровнях МЭД близких к фоновым, они должны иметь более высокую чувствительностью. Обязательным требованием является работа в спектрометрическом режиме, для определения источника излучения. А также БПЛА должен обладать возможностью «зависания» над определенным участком для накопления статистических данных.

Основные радиационно опасные объекты

Согласно принятой международной шкале ядерных и радиологических событий (INES) [14] события классифицируют по семи уровням. Следует отметить, что крупные аварии, к счастью, случаются достаточно редко. По данным МЧС Росси к радиационным событиям оказавшим существенное влияние можно отнести: аварию на производственном объединении “Маяк”, аварию на Чернобыльской АЭС, аварию на японской АЭС "Фукусима-1" и так же испытания на Семипалатинском ядерном полигоне [15]. Но, к сожалению, помимо указанных радиационных аварий в мире имеют место и другие радиационные события различной степени сложности и опасности, которых за всю историю развития атомной энергетики во всем мире было зарегистрировано более 300. Такие события хоть и имеют локальный характер, все равно представляют опасность для здоровья людей и вред экологии.

В результате работы ядерного реактора в отработанном топливе образуются высокоактивные продукты деления. Например, в ВВЭР-440 образуется I-131 – $4{,}1\cdot10^{16}$ Бк/сут, Sr-90 – $6{,}5\cdot10^{22}$ Бк/сут. К концу кампании (через 3 года) активность продуктов деления составляет $A \approx 2{,}2\cdot10^{20}$ Бк, из них

примерно половина является газообразными. В условиях штатного режима работы реактора АЭС утечки данных нуклидов практически исключены, однако выбросы этих нуклидов возможны при перезагрузке ядерного топлива. В период планово–предупредительного ремонта или перегрузки реактора (разуплотнение главного разъема, зачистка гнезд шпилек этого разъема, шлифовка металла корпуса, сварка, дезактивация парогенератора и главного циркуляционного насоса) суммарная концентрация аэрозолей может достигать до 70 – 3000 Бк/м³ (кратковременно) [16,17].

Кроме активной зоны и оборудования первого контура радиационно опасными источниками являются:

– бассейны выдержки отработанного топлива;

– системы спецводоочистки (СВО) и их оборудование;

– детали и механизмы системы управления и защиты реактора (СУЗ);

– датчики радиационно-технического контроля;

– второй технологический контур и вспомогательные контуры, при протечке теплоносителя из основного технологического контура (т.е. разгерметизация теплообменных трубок в парогенераторе).

Особою группу риска представляют мероприятия по транспортировке радиоактивных материалов по территории АЭС [18].

Существенное влияние на экологию оказывают выбросы газов и аэрозолей. Наиболее важные: Ar-41, F-18 ($T_{1/2}$ = 1,87 ч), Na-24 ($T_{1/2}$ = 14,9 ч), K-47 ($T_{1/2}$ = 12,3 ч) и радиоактивные благородные газы (РБГ) (Xe, Kr), I, Sr, La, Ru, Zn. Эти радионуклиды попадают в воздух в результате организованных и неорганизованных протечек теплоносителя. Неорганизованные протечки теплоносителя: неплотность фланцевых соединений и приводов первого контура (проектное значение 100 – 200 кг/ч). Фактически на ВВЭР-440 5 – 50 кг/ч [19,20]. Далее теплоноситель поступает в спецканализацию, либо остается в помещении и испаряется дальше. Наиболее опасен I-131 – так как он образует в больших концентрациях (накапливается в щитовидной железе). Для РБГ определяющим фактором является внешнее облучение из объема воздуха.

В процессе работы АЭС происходит образование и газо-аэрозольных радиоактивных отходов: технологические отходы – связаны с производством электроэнергии, вентиляционные отходы – связаны с вентиляцией помещений АЭС. Технологические газо-аэрозольные отходы – эжекторные газы турбин (из-за перетечек из первого контура во второй контур), газовые испарения бассейнов выдержки отработанного топлива и очистных устройств. Вентиляционные отходы – испарения протечек в помещениях АЭС и активация воздуха вблизи активной зоны. Удаляются из помещений с помощью системы спецвентиляции.

Основные радионуклиды, определяющие активность газов и аэрозолей – РБГ и I-131. Из РБГ наиболее значимые – Xe, Kr, из них долгоживущие Xe-133 (5,2 суток) и Kr-85m(4,36 часа). I-131 в виде газа или аэрозоля, а также CH_3I (йодистый метил – 50 %), Sr-89, Sr-90, Cs-137, продукты коррозии – аэрозоли.

Жидкие радиоактивные отходы образуются из-за организованных и неорганизованных протечек при дезактивации оборудования, помещений, стирке спецодежды, душевых. Для исключения попадания этих отходов в окружающую среду на АЭС организовано оборотное водоснабжение: все жидкие отходы собираются, очищаются и возвращаются обратно в технологический процесс [21].

Помимо этого, есть еще высокоактивные жидкие отходы: кубовые остатки, суспензии фильтрующих материалов, пульпы ионообменных смол. Для этих отходов на территории АЭС предназначены специальные хранилища – герметичные ёмкости с защитой [22].

На территории АЭС существуют специальные могильники – заглублённые бетонные ёмкости, изолированные от подземных вод и дождей, которые после заполнения закрываются наглухо бетонным защитным колпаком или засыпают землей и асфальтируют. Мощность эквивалентной дозы на расстоянии 1 м не более 28 мкЗв/ч [23]. Переработанные в твёрдые жидкие радиоактивные отходы захоранивают только на централизованных региональных могильниках, куда свозят отходы в специальном транспорте. Если $T_{1/2}$ < 15 суток, то предварительно выдерживаются до безопасного уровня на территории АЭС [24].

Все радиоактивные отходы можно разделить на 3 группы.

Таблица 1. Классификация радиоактивных отходов по степени опасности.

Группа	$\dot{H}$ (10см), мкЗв/ч.	A_β, Бк/кг.	A_α, Бк/кг.
1	0.3 - 300	$7.4\cdot10^4 – 3.7\cdot10^6$	$7.4\cdot10^3 – 3.7\cdot10^5$
2	300 – 10000	$3.7\cdot10^6 – 3.7\cdot10^9$	$3.7\cdot10^5 – 3.7\cdot10^8$
3	>10000	$>3.7\cdot10^9$	$>3.7\cdot10^8$

Отходы групп 1 и 2 захоранивают в наземных бетонных хранилищах, толщина стен которых обеспечивает механическую прочность и биологическую защиту. Хранилища расположены на территории АЭС (на промплощадке или вне, на охраняемых территориях).

Отходы группы 3 захоранивают в подземных изолированных ёмкостях. Для полного распада необходимо около 600 лет (за счёт Cs и Sr).

Обзор применяемых беспилотных летательных аппаратов

В данный момент для проведения мониторинга радиационной обстановки на территории АЭС применяются два типа систем: стационарная (Автоматизированная система радиационного контроля на АЭС) [25] и мобильная, представляющая собой передвижные радиометрические лаборатории [26]. Стационарная система служит, в основном, для контроля за функционированием штатных средств безопасности АЭС. Передвижные радиометрические лаборатории, используются для специальных задач: проверка причин срабатывания стационарной системы, уточнения данных, получаемых от стационарных постов радиационного контроля, или проведение радиационной разведки вне зоны действия стационарных постов контроля. Для работы передвижной радиометрические лаборатории требуется наличие штата сотрудников.

Основываясь на опыте применения БПЛА для мониторинга объектов в различных областях промышленности [27,28], можно считать, что единственным оптимальным способом для проведения постоянного мониторинга радиационной обстановки на территории АЭС и контроля за работами её штатных систем безопасности является использование комплекса на основе БПЛА [29]. Комплекс позволит в постоянном режиме получать информацию о радиационной обстановке всей территории АЭС так и проводить детальную разведку вокруг какого-либо объекта.

В России на данный момент не существует единой принятой классификации БПЛА [30], существует большое количество различных классификаций беспилотных летательных аппаратов [31] таких как: назначение; тип системы управления; принцип полета; классификация по летным параметрам; тип крыла; направление взлета/посадки; тип взлета/посадки; тип двигателя; топливная система.

Наиболее оптимальным для решения требуемой задачи является использование БПЛА легкого класса мультикоптерного типа. Рассмотрим некоторые БПЛА, характеристики которых попадают в данные рамки.

БПЛА «Гранад ВА-1000» (Рисунок 1) производства ООО «ЮВС АВИА» по лицензии немецкой компании «Microdrones» (сборка производится в г. Смоленск) имеет лёгкую конструкцию из углеродного волокна и других высокотехнологичных материалов, его моторы не нуждаются в обслуживании. Он может совершать вертикальный взлет и посадку с площадки размером не более 5х5 м с последующим переходом к горизонтальному полету. Аппарат может летать с помощью дистанционного управления или автономно на основе навигационной системы GPS - ГЛОНАСС.

Рисунок 1 – Внешний вид БПЛА Гранад ВА-1000

Комплекс ZALA 421-06 (Рисунок 2) производства ZALA AERO GROUP (г. Ижевск) предназначен для наблюдения подстилающей поверхности, поиска и обнаружения объектов в режиме зависания и движения. Обеспечивает получение и передачу информации по цифровым каналам в реальном времени и масштабе телевизионного, тепловизионного изображения местности, определение координат и объектов наблюдения, сбор, накопление и обработку иной информации. Комплекс обеспечивает взлет, полет с возможностью зависания и посадку вертолетов в автоматическом режиме. БПЛА ZALA 421-06 - это первый беспилотный вертолет, поставленный на вооружение в МВД РФ.

Рисунок 2 – Внешний вид БПЛА «ZALA 421-06»

Сравнительные характеристики вышеперечисленных БПЛА приведены в таблице 2.

Таблица 2. Сравнительные характеристики БПЛА

Модель	Гранад ВА-1000	ZALA 421-06
Взлет/ посадка	вертикальная	вертикальная
Диапазон скоростей полета, км/ч	0 – 54	0 – 50
Предельная дальность, км	40	15
Продолжи-тельность полета, ч	1,5	1,5
Предельная высота полета, м	до 4000	до 2000
Взлетная масса, кг	5,55	12
Масса полезной нагрузки, кг	1,2	2
Габариты, мм	∅1030	400×1600× ×670

Из приведенной таблицы следует, что вес полезной нагрузки для аппаратов вертикального взлета не превышает 2 кг, что накладывает ограничение на массу разрабатываемого блока детектирования.

В качестве примеров использующейся полезной нагрузки, позволяющей превратить БПЛА в средство радиационной разведки можно привести разработки НПЦ «Аспект» и ФБУ «НТЦ Энергобезопасность». Мобильное средство радиационной разведки на базе беспилотного летательного аппарата MD4-1000 [32] содержит измерительный блок, позволяющий выполнять измерения

мощности дозы в широком диапазоне (от 10-7 до 10-1 Зв/ч). В состав измерительного блока входит спектрометр на основе детектора NaI(Tl) размерами ∅31×31 мм, а также два счетчика Гейгера-Мюллера. Масса блока составляет 0,6 кг. Габаритные размеры 111×90×126 мм. Полет производится по программно заданной траектории с набором спектров. Измерительный блок позволяет локализовывать и определять параметры точечного источника Cs-137 активностью порядка 109 Бк.

Выбор детектирующего элемента

Применение блока детектирования на БПЛА оказывает серьезные ограничения на его масса-габаритные размеры, ввиду этого использование в качестве чувствительного элемента наиболее широко распространенного сцинтиллятора NaI(Tl) на данный момент не является оптимальным. Основываясь на современных данных приведем сравнительный анализ нескольких возможных вариантов детектирующих элементов

Кристалл $LaBr_3$(Ce) обладает высоким световыходом, и по разрешающей способности превосходит широко применяемый в эксплуатируемых системах сцинтиллятор Nal(TI) [33]. Разрешение детектора по линии Cs-137 $\eta_{662КэВ}$ составляет 2,5 ÷ 3,5 %. В виду высокого энергетического разрешения LaBr3(Ce), позволяет определять большее количество нуклидов, чем кристалл NaI(Tl). Разрешение с учетом разброса сигнала на выходе фотоумножителя ~2,6 %, достигнутое при комнатной температуре для кристалла $LaBr_3$(Ce) объемом 1 см3, почти в 2 раза лучше, чем в случае кристалла Nal(Tl) такого же размера [34]. Важное свойство сцинтиллятора $LaBr_3$(Ce) - это короткие спектрометрические сигналы, позволяющие проводить спектрометрические измерения при больших загрузках, то есть осуществлять спектрометрический анализ гамма-источников высокой активности. Недостатком детекторов на основе лантана является наличие собственного гамма-излучения из цепочки распада La-138, а также альфа - и бета-излучения из цепочки распада Ac-227, который близок по химическим свойствам к La и поэтому также присутствует в сцинтилляторе $LaBr_3$(Ce).

Другим способом возможным способом является использование в качестве детектирующего элемента полупроводников с широкой запрещенной зоной [35], которые работают при комнатной температуре и имеют высокое энергетическое разрешение. Наиболее оптимальным является применение детектора рентгеновского и гамма-излучения с достаточно высоким разрешением и высокой скоростью счета на основе материал CdZnTe. Характеристики CdZnTe детекторов [36] позволяют успешно использовать в атомной промышленности и медицине, в космических исследованиях и при обеспечении радиационной безопасности. Полупроводниковые детекторы на основе кристалла CdZnTe отличаются высокой эффективностью регистрации излучения, относительно хорошим соотношением сигнал/шум и энергетическим разрешением при комнатной температуре[36–38]. Линейность в счетном и токовом режимах работы в широком диапазоне измеряемой мощности дозы и высокая радиационная стойкость этого материала позволяет использовать его при производстве дозиметрических блоков с высоким радиационным ресурсом.

Основные сравнительные характеристики различного типа детекторов представлены в таблице 3.

(Таблица основана по данным материалов из работы [39]).

Таблица 3. Сравнительные характеристики трех детекторов γ-излучения

Характеристика	Детектор		
	NaI(Tl)	$LaBr_3$(Ce)	CdZnTe
Плотность г, г/см^3	3,67	5,08	6
Световыход *LY*, фотон/МэВ	38 000	63 000	338 000 (электронно-дырочных пар)
Температурный коэффициент свето-выхода, % / °C	-0,3	0,02	-
Постоянная высвечивания τ_{LD}, нс	230, 250	16	-
Энергетическое разрешение $\eta_{662\ КэВ}$ детектора (Ø 1,5" x 1,5") по линии ^{137}Cs, КэВ	43 (обычно 50)	20	9
Максимально достижимый объем рабочего вещества детектора, см^3	4200	Более 1400	3
Стоимость (оценочно), $/см^3	2	~ 65 (монопольная)	150 (собственно кристалл)

Заключение

На территории АЭС помимо непосредственно самого энергоблока находится большое количество потенциально опасных объектов. В дополнение к стационарным системам радиационного мониторинга предлагается система на базе БПЛА. Применение БПЛА позволит проводить как мониторинг радиационной всей территории АЭС в автономном режиме, проводить контроль работы штатных систем зашиты объектов, а также следить за операциями транспортировки радиоактивных веществ по территории АЭС. Исходя их специфики задачи установлено, что наиболее оптимальным будет применение БПЛА коптерного типа. В качестве детектирующего элемента предложено использование сцинтиллятора $LaBr_3$(Ce) или полупроводникового детектора на основе CdZnTe, обладающих наиболее высокой чувствительностью, разрежающей способностью по сравнению с детекторами на основе сцинтиллятора NaI(Tl).

1. Сайт https://www.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/OperationalReactorsByCountry.aspx, (обращение 01.05.2018).
2. Сайт http://www.rosatom.ru/journalist/news/-v-2017-godu-aes-rossii-ustanovili-absolyutnyy-rekord-vyrabotki-202-868-mlrd-kvt-ch/ (обращение 01.05.2018).
3. «Энергетическая стратегия России на период до 2030 года», Министерство энергетики Российской Федерации.
4. «Концепцией долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2020 года», Правительство Российской Федерации.
5. Morichi, M., Toubon, H., Bronson, F., Venkataraman, R., Beaujoin, J., Dubart, P. (2013), “Nuclear Measurement Technologies & Solutions Implemented During Nuclear Accident at Fukushima” Advancements in Nuclear Instrumentation Measurement Methods and their Applications (ANIMMA), 2013 3rd International Conference, pp. 1—8.
6. Vetter, K.,Chivers, D. H., Aucott, T., Bates, C., Coffer, A., Curtis, J., Hogan, D., Iyengar, A, Looker, Q., Miller, J., Negut, V., Plimley, B., Satterlee, N., Supic, L., Yee, B. (2011) “Measurements of Fukushima fallout by the Berkeley Radiological Air and Water Monitoring project”, Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC), pp. 18—24.

7. Torii, T., Sanada, Y., “Radiation measurement by unmanned aircraft after Fukushima Daiichi nuclear power plant accident”, Remotely Piloted Aircraft Systems Symposium ICAO Headquarters, Montrйal, Canada 23 — 25 March 2015.
8. Cai, C., Carter, B., Srivastava, M., Tsung, J., Vahedi-Faridi, J., and Caroline, W. (2016) “Designing a Radiation Sensing UAV System”, 2016 IEEE Systems and Information Engineering Design Conference
9. (SIEDS '16), pp. 165—169.
10. “A new UAV for background radiation monitoring is developed for Russian meteorology and ecological monitoring corporation Rosgidromet”, URL: http://unmanned.ru/en/news/2014–06-02.htm.
11. Sachenko, A., Kochan, V., Kharchenko, V., Roth, H., Yatskiv, V., Chernyshov, M., Bykovyy, P., Roshchupkin, O., Koval, V., Fesenko, H. (2016), “Mobile Post-Emergency Monitoring System for Nuclear Power Plants”, ICT in Education, Research and Industrial Applications : Integration, Harmonization and Knowledge Transfer, Proceedings of the 12th International Conference, ICTERI 2016, June 21–24, 2016, Kyiv, Ukraine, pp. 384—398.
12. Заявка на патент 2013110917 «Автоматизированный беспилотный комплекс для экологического мониторинга» Пашкевич М.А., Смирнов Ю.Д., Кремчеев Э.А., Данилов А.С. (2006).
13. Система послеаварийного мониторинга АЭС с использованием беспилотных летательных аппаратов: концепция, принципы построения, А.А. Саченко, В.В. Кочан, В.С. Харченко, М.А. Ястребенецкий, Г.В. Фесенко, М.Э. Яновский. Ядерна та радіаційна безпека, 1, С. 24-29, (2017).
14. «Международная шкала ядерных событий», Международное агентство по атомной энергии («International Nuclear Event Scale», International Atomic Energy Agency, https://www.iaea.org/sites/default/files/ines.pdf), 2008.
15. Сайт http://rb.mchs.gov.ru/mchs/radiation_accidents, (обращение 01.05.2018).
16. Оценка профессионального облучения вследствие поступления радионуклидов. Руководство по безопасности. Серия норм МАГАТЭ по безопасности № RS-G-1.2. Международное Агентство по атомной энергии. Вена 1999 г.
17. Радиационная безопасность. Рекомендации МКРЗ 1990, Публикация 60,ч.1 и 2.Москва. Энергоатомиздат,1994. - С.-191; - 207.
18. Новости «На Ямале потеряли чемоданчик с радиоактивным цезием» Сайт http://www.ntv.ru/novosti/1984121/ (обращение 01.05.2018).
19. Шарафутдинов Р.Б., Кавун О.Ю., Харитонова Н.Л., Репников Н.Ф. «Расчетная оценка накопления радионуклидов на фильтрах системы обессоливания турбинного конденсата для установления допустимой протечки теплоносителя в парогенераторах аэс с ввэр-1000» «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности». (2012).
20. Руководящий документ эксплуатирующей организации ОАО «Концерн Росэнергоатом»//Типовая инструкция по эксплуатации блочной обессоливающей установки АЭС с реакторами ВВЭР-1000. РД ЭО 0323-01. (2001).
21. Технологические и организационные аспекты обращения с радиоактивными отходами //Серия учебных курсов МАГАТЭ. Вена, МАГАТЭ, 2005.
22. Кузнецов В.М., Никитин В.С., Хвостова М.С. Радиоэкология и радиационная безопасность (история, подходы, современное состояние). — М.: НИПКЦ Восход-А, (2011).
23. Россман Г.И., Быховский Л.З., Самсонов Б.Г. Хранение и захоронение радиоактивных отходов (системный обзор) // Минеральное сырье. №15. — М.: ВИМС, 2004.
24. Федеральный закон от 11.07.2011 № 190-ФЗ «Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации». — URL: http://base.consultant. ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc;base=LAW;n=116552
25. Хамьянов Л.П., Елохин А.П., Рау Д.Ф., Чистохин В.М. Автоматизированная система радиационного контроля на АЭС. Теплоэнергетика, Энергоатомиздат, 1989, №12, с.21–23.
26. А.Ю. Симаков, Организация радиационного контроля в районе размещения ростовской АЭС Глобальная ядерная безопасность, № 2-3 (4) 2012.
27. Мониторинг обьектов ОАО «ГАЗПРОМ» с помошью БЛА, Сайт http://bp-la.ru/monitoring-obektov-oao-gazprom-s-pomoshyu-bla/, (обращение 01.05.2018).

28. Использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в электроэнергетике, Сайт https://www.pwc.ru/ru/industries/power-and-utilities/power_and_utilities_drones_powered_solutions.pdf, (обращение 01.05.2018).
29. Герасимов Е.М., Штырова И.А., Разработка программного обеспечения устройства территориального мониторинга АЭС, Молодой учёный, . № 22.5 (102.5), 2015.
30. Лопота А.В., Николаев А.Б. Беспилотные летательные аппараты (монография), ЦНИИ РТК (2017).
31. Обобщённая классификация беспилотных летательных аппаратов, А.Г. Корченко, О.С. Ильяш, Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил, 4 (33), 2012.
32. Мобильное средство радиационной разведки на базе беспилотного летательного аппарата, Богатов С.А., Гаврилов С.Л., Ткаченко С.А., Шведов А.М., Алексеев А.В., Лизунов Е.М., Мазный Н.Г., Пугачев А.Н., доклад, сайт https://www.google.ru/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKEwiUy6eauYTbAhWrCJoKHcRgCcYQFggoMAA&url=http%3A%2F%2F2012.ismart.kharkov.ua%2Fpresentations%2F22%2F22_16-45_Shvedov.pdf&usg=AOvVaw3kZB37XMXn4jS5nq-yVDsf, (обращение 01.05.2018).
33. Uranium Enrichment Assay with a LaBr3(Ce) Scintillation Detector / Ottmar H. [et al.] // ESSADA BULLETIN. 2008. № 38. P. 32-39.
34. Glodo J., Kuhn A., Higgins W.M. et al. // IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record. 2006. № 43-2. P. 1570.
35. Полупроводниковые детекторы в экспериментальной физике / Ю.К. Акимов, О.В. Игнатьев, А.И. Калинин, В.Ф. Кушнирук; под ред. Ю.К. Акимова – Москва: Энергоатомиздат, 1989. – 342 с.
36. Левенец В.В. Спектрометрия гамма-и альфа-излучений полупроводниковыми детекторами на основе CdTe (CdZnTe), изготовленными в ННЦ ХФТИ /В.В. Левенец, А.П. Омельник, А.А. Щур, и др. // Ядерна фізика таенергетика, № 4 (22), 2007. – С. 109 – 113.
37. Ткачук П.М. Визначення функціональних можливостей детекторів ядерного випромінювання з активними елементами на основі монокристалів CdTe<Cl> / П.М. Ткачук // Науковий вісник Чернівецького університету, Випуск “Фізика. Електроніка”. – 2005. – № 268. – С. 28–32.
38. Давыдов Л.Н. Радиационная стойкость полупроводниковых детекторов корпускулярного и гамма-излучения / Л.Н. Давыдов, А.А. Захарченко, Д.В. Кутний и др. // Вісник Харківського університету. – 2005. – № 657, Вип. 1(26). – С. 3-22.
39. Redus R. CdTe Detectors for Quantitative X-Ray Fluorescence [электронный ресурс] / R. Redus, J. Pantazis, [et al.] // Proceedings of the 2007 Denver X-ray Conference “DXC-2007”, July, 30 – August, 3, 2007.–Denver,USA.–2007.–P.1–25. Режимдоступа:http://www.dxcicdd.com/07/PDF/Robert_Redus.pdf

E.S. Briskin, Ya.V. Kalinin, M.V. Miroshkina

WAYS OF MINIMIZE ENERGY COSTS FOR THE WALKING ROBOTS MOVEMENT AT ITS DISPLACEMENT ALONG A COMPLEX PROFILE

Volgograd State Technical University, Volgograd
dtm@vstu.ru

Abstract

There is the solution of one of the problems arising in the design of mobile walking robots: the problem of reducing energy costs on displacement of a walking robot, increasing the efficiency of a multi-legged mechanism and a reduction of the developed power due to a change in the mode of motion of the multi-legged walking robot.

Key words: multi-legged walking robot, the gait of a multi-legged walking robot, minimum energy consumption.

Е.С. Брискин, Я.В. Калинин, М.В. Мирошкина

ПУТИ МИНИМИЗАЦИИ ЭНЕРГОЗАТРАТ НА ПЕРЕМЕЩЕНИЕ ШАГАЮЩЕГО РОБОТА ПРИ ЕГО ДВИЖЕНИИ ПО СЛОЖНОМУ ПРОФИЛЮ

Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград
dtm@vstu.ru

Аннотация

Представлено решение одной из проблем, возникающих при проектировании мобильных шагающих аппаратов: проблемы сокращения затрат энергии при движении шагающего робота, повышения к.п.д. многоногого механизма и снижения развиваемой мощности за счёт изменения режима движения многоногого шагающего робота.

Ключевые слова: многоногий шагающий робот, походка многоногого шагающего робота, минимум энергозатрат.

Введение

Одна из актуальных задач, стоящих перед разработчиками многоногих шагающих машин, состоит в повышении их энергоэффективности и снижении динамических нагрузок, действующих на исполнительные привода и корпус машины. Низкая энергоэффективность и высокие динамические нагрузки обусловлены принципиальной неуравновешенностью шагающих движителей различных типов и их дискретным периодическим взаимодействием с опорной поверхностью [9]. Методы решения поставленной задачи могут основываться и основываются на уравновешивании движителей как механизмов, введении рекуператоров энергии [1, 3], преобразующих кинетическую энергию переносимого движителя в потенциальную энергию некоторого упругого элемента и обратно.

С этой же целью возможно целенаправленно управлять походкой [5] и характером переносимого движения движителя [6, 7, 8]. Известно, что выбором режима движения можно вместо кубичной зависимости тепловых потерь в приводах двигателей от скорости движения [1] получить зависимость обратно-пропорциональную скорости [10]. Такой режим был получен при изучении поступательного движения корпуса робота с прямолинейным движением центра масс и движителей как материальных точек, перемещающихся вдоль горизонтальной оси. Однако, при переносе движителя в новое положение, последний, в зависимости от вида и характера препятствий, помимо курсового перемещения поднимается на определенную высоту, а затем опускается на грунт.

Известен вид траектории переноса опоры шагающего движителя, предложенный Н.В. Умновым (рис. 1). Такой вид траектории обусловлен недостаточной развитостью в 70-х годах прошлого столетия информационно-измерительных систем и необходимостью предусматривать подъем и опускание стопы в любых ситуациях без «спотыкания» и горизонтального ее скольжения на грунте независимо от неидентифицированного профиля грунта. Однако при наличии информации о профиле опорной поверхности, можно целенаправленно изменять законы переноса стопы движителя в курсовом и

ортогональном к нему направлении. В частности, можно уменьшить пройденный стопой путь (рисунок 1, кривая 2).

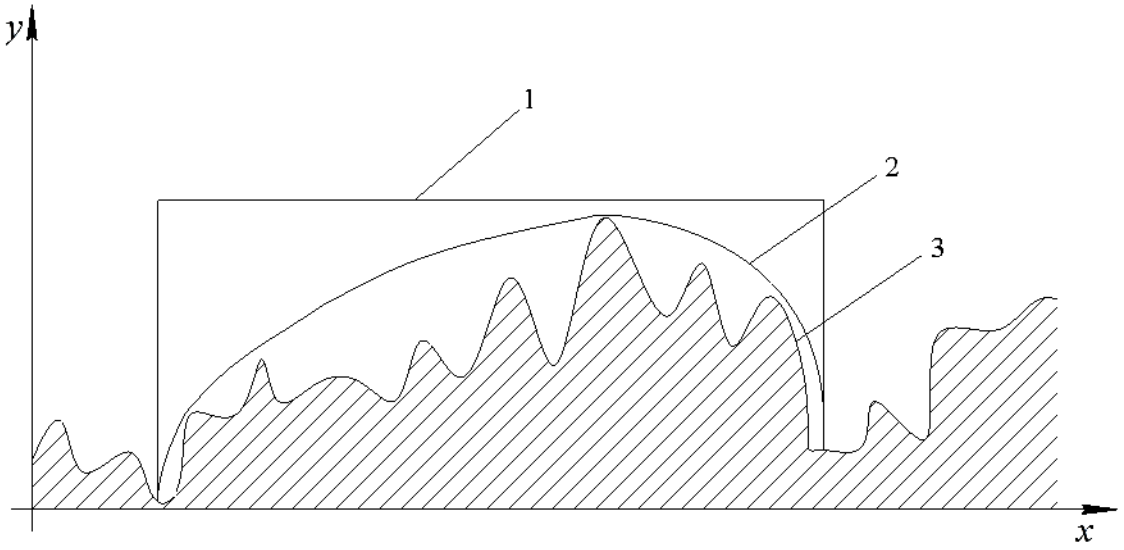


Рисунок 1 – Траектории переноса стопы движителя:
1 – абсолютная траектория по Н.В. Умнову; 2 – возможная траектория; 3 – профиль опорной поверхности

Постановка задачи

Рассматривается поступательное, вдоль горизонтальной оси, движение корпуса массы M шагающего робота и движение в вертикальной плоскости XOY стопы массы m, как материальной точки (рисунок 2).

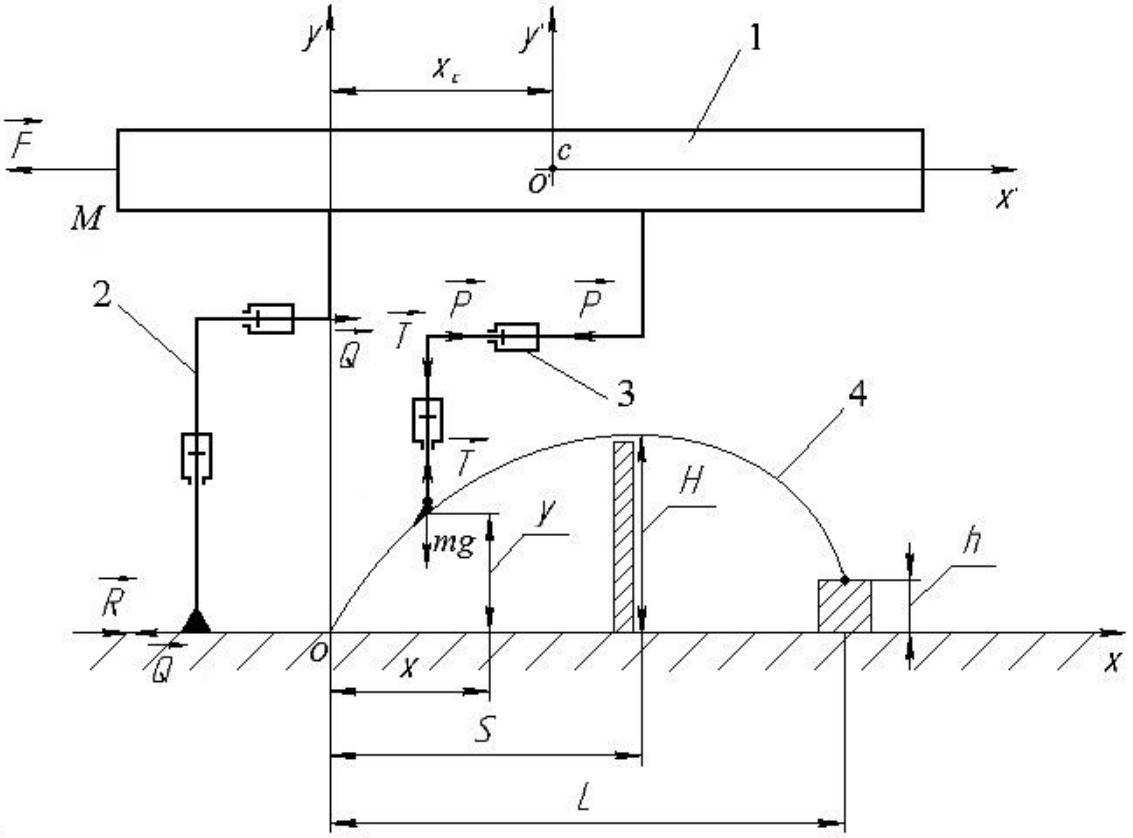


Рисунок 2 – Расчетная схема
1 – корпус робота; 2 – движитель, взаимодействующий с опорной поверхностью; 3 – переносимый движитель; 4 – траектория стопы переносимого движителя

Движение поддерживается тремя приводами: приводом горизонтального перемещения корпуса, развивающего силу Q, равную силе взаимодействия стопы с грунтом R; приводом горизонтального перемещения переносимой стопы, развивающего силу P; приводом вертикального перемещения переносимой стопы, развивающей силу T. Длина шага по следовой дорожке равна L, а расстояние до единичного препятствия высотой H равно S. Взаимодействие переносимой стопы с опорной поверхностью осуществляется на высоте h.

Дифференциальные уравнения, описывающие движение рассматриваемой системы имеют вид:

$$\begin{cases} M\ddot{x_c} = Q - F - P \\ m\ddot{x} = P \\ m\ddot{y} = T - mg \end{cases} \qquad (2.1)$$

где F – сила сопротивления движения;

g – ускорение свободного падения.

Среди показателей, характеризующих качество движения, учитываются: уровень тепловых потерь W и среднеквадратичное ускорение a_σ корпуса в поступательном курсовом движении.

Первый показатель характеризует энергоэффективность движителей, а второй – комфортабельность движения. При изучении стационарных режимов движения эти показатели рассчитываются на одном периоде движения τ (периоде полного цикла перемещения движителя) [4].

$$W = \alpha \int_0^\tau Q^2 dt + \alpha \int_0^\tau P^2 dt + \beta \int_0^\tau T^2 dt \qquad (2.2)$$

$$a_\sigma = \sqrt{\frac{1}{\tau}\int_0^\tau \ddot{x_c}^2 dt}$$

где α, β – известные параметры двигателей.

Ставится задача определения таких законов движения $x_c(t)$, $x(t)$, $y(t)$, которые обеспечивают как преодоление препятствий, так и минимальность или уровня тепловых потерь W, или среднеквадратичного ускорения корпуса a_σ, или комплексного критерия I [2]:

$$I = K_1 W + K_2 a_\sigma. \quad (2.3)$$

В (2.3) K_1, K_2 – субъективно вводимые весовые коэффициенты, соотношение между которыми является аргументом для построения Парето-оптимальной границы показателей.

Метод решения

Метод решения основан на разбиении движения на 2 этапа (в случае наличия N препятствий на N+1 этапов) и на каждом i-ом этапе, определяемом временем τ_i, решаются дифференциальные уравнения (2.1) с граничными условиями:

I этап $0<t<\tau_1$

при $t = 0$: $x_c = x = y = 0$, $\dot{x_c} = V_0$, $\dot{x}=\dot{y}=0$;

при $t = \tau_1$: $x_c = \xi$, $x = S$, $y = H$, $\dot{x_c}=\dot{\xi}$, $x = \dot{S}$, $\dot{y}=0$.

II этап $0<t<\tau-\tau_1$

при $t = 0$: $x_c = \xi$, $x = S$, $y = H$, $\dot{x_c}=\dot{\xi}$, $x = \dot{S}$, $\dot{y}=0$;

при $t = \tau-\tau_1$, $x_c = 0{,}5L$, $x = L$, $y = h$, $\dot{x_c} = V_0$, $\dot{x}=\dot{y}=0$.

Таким образом, определение оптимальных законов движения $x_c(t)$, $x(t)$, $y(t)$ включает в себя и определение постоянных: τ_1, ξ, $\dot{\xi}$, $\dot{S}$. Для этого на каждом из этапов составляются уравнения Элейлера-Пуассона для вариационной задачи:

$$\delta I = \delta \int_0^\tau \Phi dt = 0 \quad (3.1)$$

с подынтегральной функцией:

$$\Phi = K_1[\alpha(Q^2 + P^2) + \beta T^2] + K_2(\ddot{x_c})^2 =$$
$$= K_1[\alpha[(M\ddot{x_c} + m\ddot{x} + F)^2 + (m\ddot{x})^2] + \beta(m\ddot{y} + mg)^2] + K_2(\ddot{x_c})^2 \qquad (3.2)$$

В окончательном виде эти уравнения имеют вид:

$$\dddot{x_c} = 0;\ \dddot{x} = 0;\ \dddot{y} = 0 \quad (3.3)$$

Решения полученных уравнений имеют вид полиномов третьей степени.

I этап $0<t<\tau_1$

$$x_c = V_{co}t + \left[3\frac{\xi}{\tau_1^2} - \frac{\dot{\xi}}{\tau_1} - 2\frac{V_{co}}{\tau_1}\right]t^2 + \left[\frac{\dot{\xi}}{\tau_1^2} - 2\frac{\xi}{\tau_1^3} + \frac{V_{co}}{\tau_1^2}\right]t^3;$$
$$x = \left(\frac{3S}{\tau_1^2} - \frac{\dot{S}}{\tau_1}\right)t^2 + \left(\frac{\dot{S}}{\tau_1^2} - 2\frac{S}{\tau_1^3}\right)t^3;\ y = \frac{3H}{\tau_1^2}t^2 - \frac{2H}{\tau_1^3}t^3 \qquad (3.4)$$

II этап $0<t<\tau-\tau_1$

$$x_c = \xi + \dot{\xi}t + \left[3\frac{(L-\xi)}{(\tau-\tau_1)^2} - \frac{V_{co}}{\tau-\tau_1} - \frac{2\dot{\xi}}{\tau-\tau_1}\right]t^2 + \left[\frac{\dot{\xi}}{(\tau-\tau_1)^2} + \frac{V_{co}}{(\tau-\tau_1)^2} - 2\frac{(L-\xi)}{(\tau-\tau_1)^3}\right]t^3$$
$$x = S + \dot{S}t + \left[3\frac{(2L-S)}{(\tau-\tau_1)^2} - \frac{2\dot{S}}{\tau-\tau_1}\right]t^2 + \left[\frac{\dot{S}}{(\tau-\tau_1)^2} - \frac{2(2L-S)}{(\tau-\tau_1)^3}\right]t^3 \qquad (3.5)$$
$$y = H + \frac{3(h-H)}{(\tau-\tau_1)^2}t^2 - \frac{2(h-H)}{(\tau-\tau_1)^3}t^3$$

Опираясь на (3.4) и (3.5) из уравнений (2.1) определяются $Q(t)$, $P(t)$, $T(t)$, а затем из (2.2) W, a_σ.

Эти результаты позволяют установить зависимости рассматриваемых показателей от профиля преодолеваемого препятствия S, H, h; длины шага L; скорости корпуса V_{co} в момент начала преодоления препятствия, режима движения τ_1, ξ, $\dot{\xi}$, $\dot{S}$ и относительной значимости показателей K_2/K_1.

Окончательно безразмерный критерий I имеет вид:

$$I = \frac{K_1\alpha}{MgH}\left[\frac{MB_1+mD_1}{3}\tau_1^3 + \frac{MB_2+mD_2}{3}(\tau-\tau_1)^3 + (MB_1+mD_1)(MA_1+mC_1+F)\tau_1^2 + (MB_2 + \right.$$
$$+mD_2)(MA_1+mC_1+F)(\tau-\tau_1)^2 + (MA_1+mC_1+F)^2\tau_1 + (MA_2+mC_2+F)^2(\tau-\tau_1) + m^2C_1^2\tau_1 +$$
$$+m^2C_2^2(\tau-\tau_1) + m^2C_1D_1\tau_1^2 + m^2C_2D_2(\tau-\tau_1)^2 + \frac{1}{3}m^2D_1^2\tau_1^3 + \frac{1}{3}m^2D_2^2(\tau-\tau_1)^3\Big] + \frac{K_1\beta}{MgH}\Big[\frac{1}{3}m^2G_1^2\tau_1^3 +$$
$$+\frac{1}{3}m^2G_2^2(\tau-\tau_1)^3 + m^2G_1(E_1+g)\tau_1^2 + m^2G_2(E_2+g)(\tau-\tau_1)^2 + m^2(E_1+g)^2\tau_1 + m^2(E_2+g)(\tau -$$
$$-\tau_1)\Big] + \frac{K_2}{g}\left[A_1^2\tau_1 + A_2^2(\tau-\tau_1) + A_1B_1\tau_1 + A_2B_2(\tau-\tau_1) + \frac{1}{3}B_1^2\tau_1^3 + \frac{1}{3}B_2(\tau-\tau_1)^3\right] \qquad (3.6)$$

где

$$A_1 = 2\left[3\frac{\xi}{\tau_1^2} - \frac{\xi}{\tau_1} - 2\frac{V_{co}}{\tau_1}\right];\ B_1 = 6\left[\frac{\xi}{\tau_1^2} - 2\frac{\xi}{\tau_1^3} + \frac{V_{co}}{\tau_1^2}\right];\ C_1 = 2\left(\frac{3S}{\tau_1^2} - \frac{\dot{S}}{\tau_1}\right);\ D_1 = 6\left(\frac{\dot{S}}{\tau_1^2} - 2\frac{S}{\tau_1^3}\right);$$
$$E_1 = \frac{6H}{\tau_1^2};\ G_1 = \frac{12H}{\tau_1^3};\ A_2 = 2\left[\frac{3(L-\xi)}{(\tau-\tau_1)^2} - \frac{2\dot{\xi}}{\tau-\tau_1} - \frac{V_{co}}{\tau-\tau_1}\right];\ B_2 = 6\left[\frac{\dot{\xi}}{(\tau-\tau_1)^2} + \frac{V_{co}}{(\tau-\tau_1)^2} - 2\frac{L-\xi}{(\tau-\tau_1)^3}\right];$$
$$C_2 = 2\left[\frac{3(2L-S)}{(\tau-\tau_1)^2} - \frac{2\dot{S}}{\tau-\tau_1}\right];\ D_2 = 6\left[\frac{\dot{S}}{(\tau-\tau_1)^2} - \frac{2(2L-S)}{(\tau-\tau_1)^3}\right];\ E_2 = \frac{6(h-H)}{(\tau-\tau_1)^2};\ D_2 = -\frac{12(h-H)}{(\tau-\tau_1)^3}.$$

Заключение

Таким образом, следует вывод, что движение, при котором можно уменьшить пройденный стопой путь, осуществляется путем сочетания работы механизмов горизонтальных и вертикальных перемещений, следовательно, при одновременной работе приводов энергозатраты должны принимать минимальное значение. Для достижения решения сформулированной задачи необходимо определить значение скорости, с которой будет осуществляться подъем ноги в зависимости от расстояния до препятствия и его высоты, разработать систему управления для организации данного вида движения и доказать экспериментальным путем, что при таком перемещении шагающего робота энергозатраты на перемещение шагающей машины будут минимальны.

1. Лапшин, В.В. Модельные оценки энергозатрат шагающего аппарата / В.В. Лапшин // Известия РАН. МТТ. 1985 №5. С. 28.

2. Малолетов, А.В. Оптимизация структуры, параметров и режимов движения шагающих машин со сдвоенными движителями : монография / А.В. Малолетов, Е.С. Брискин; ВолгГТУ. - Волгоград, 2015. - 174 с.
3. Охоцимский, Д.Е Шагающие машины / Д.Е. Охоцимский, А.К. Платонов, А.А. Кирильченко, В.В. Лапшин // Препринт Ин-та прикл. матем. АН СССР.—М., 1989.—36 с.
4. Малолетов, А.В. Оптимизация структуры, параметров и режимов движения шагающих машин со сдвоенными движителями : монография / А.В. Малолетов, Е.С. Брискин; ВолгГТУ. - Волгоград, 2015. - 174 с.
5. Об оценке эффективности цикловых механизмов / Е.С. Брискин, Я.В. Калинин, А.В. Малолетов // Известия РАН. Механика твёрдого тела. - 2017. - № 2 (март-апрель). - С. 13-19.
6. Об оценке эффективности шагающих роботов на основе многокритериальной оптимизации их параметров и алгоритмов движения / Е.С. Брискин, Я.В. Калинин, А.В. Малолетов, В.А. Шурыгин // Известия РАН. Теория и системы управления. - 2017. - № 2 (Март – Апрель). - С. 168-176.
7. Об управлении адаптацией ортогональных шагающих движителей к опорной поверхности / Е.С. Брискин, Я.В. Калинин, А.В. Малолетов, В.А. Серов, С.А. Устинов // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. - 2017. - № 3 (май–июнь). - С. 184-190.
8. Об энергетической эффективности цикловых механизмов / Е.С. Брискин, Я.В. Калинин, А.В. Малолетов, С.А. Устинов, В.А. Серов // Известия РАН. Теория и системы управления. - 2017. - № 3 (май-июнь). - С. 184-190.
9. Охоцимский, Д.Е. Механика и управление движением автоматического шагающего аппарата / Д.Е. Охоцимский, Ю.Ф. Голубев // М.: Наука. 1984. 312 с.
10. Энергетическая эффективность походок мобильного шагающего робота / Я.В. Калинин, Е.С. Брискин // Известия ВолгГТУ. Сер. Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах. - Волгоград, 2016. - № 6 (185). - С. 77-81.

A.V. Zuev [1,2], V.F. Filaretov [1,2], A.N. Zhirabok [2]

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF THE SYSTEM OF TYPICAL FAULT DIAGNOSIS IN ELECTRIC DRIVES OF MANIPULATORS

[1]Institute of Automation and Control Processes FEB RAS, Vladivostok, Russia
[2]Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia
zuev@dvo.ru, filaret@dvo.ru, zhirabok@mail.ru

Abstract

This paper presents solution to problem of synthesis and study of an effective system for diagnosing typical faults appearing in electric drives of manipulators, described by nonlinear differential equations. The proposed diagnostic system is based on the use of diagnostic observers built using the logical-dynamic approach, which makes it possible to apply linear methods in diagnosing nonlinear objects. To accurately determine the real-time values of the appearing faults in observers, it is suggested to introduce a special feedback on the residual signal that ensures the observer's work in a sliding mode.

Key words: electric drive, manipulator, faults, diagnosis, nonlinear system, observer.

А.В. Зуев[1,2], В.Ф. Филаретов[1,2], А.Н. Жирабок[2]

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ТИПОВЫХ ДЕФЕКТОВ В ЭЛЕКТРОПРИВОДАХ МАНИПУЛЯТОРОВ

[1]Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, г. Владивосток, Россия
[2]Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток, Россия
zuev@dvo.ru, filaret@dvo.ru, zhirabok@mail.ru

Аннотация

В докладе решается задача разработки нового метода синтеза систем диагностирования типовых дефектов, появляющихся в электроприводах многозвенных манипуляторов, описываемых

нелинейными дифференциальными уравнениями. Предложенный метод основан на использования диагностических наблюдателей, построенных с помощью логико-динамического подхода, позволяющего применять линейные методы при диагностировании нелинейных объектов. Для точного определения в реальном масштабе времени величин появляющихся дефектов в наблюдатели, которые в общем случаем могут быть произвольной размерности, предложено вводить специальную обратную связь по сигналу невязки, которая обеспечивает работу наблюдателя в скользящем режиме.

Ключевые слова: электропривод, манипулятор, дефект, диагностирование, нелинейная система, наблюдатель.

Введение

Сейчас функциональное диагностирование [1-2] является одним из перспективных средств повышения эффективности эксплуатации робототехнических объектов различного вида и назначения. Оно позволяет производить проверку правильности функционирования этих сложных объектов в процессе выполнения ими своих основных функций и оперативно поставлять информацию о возникающих сбоях и дефектах.

В настоящее время существует несколько различных подходов к синтезу систем диагностирования дефектов (СДД) для робототехнических объектов. Однако известные методы построения СДД [3-6] в основном ориентированы на линейные динамические объекты или предполагают дифференцируемость функций, входящих в их модели. Но электроприводы многозвенных манипуляторов описываются сложными нелинейными дифференциальными уравнениями, да еще и с переменными параметрами [7, 8]. Нелинейности в этих объектах обусловлены существенными взаимовлияниями между всеми степенями подвижности многозвенников, сухим трением, люфтами механических передачи и т.д. Все это приводит к появлению отличных от нуля невязок, формируемых СДД, даже при отсутствии дефектов. Причем синтезируемые стандартными методами СДД часто получаются высокой размерности, что очень затрудняет или делает практически невозможной решение задачи точной идентификации величин возникающих дефектов.

Известны методы построения ССД на основе скользящих наблюдателей, которые за счет особенностей скользящего режима [9, 10] активно используются на практике для оправления дефектов и построения отказоустойчивых систем, чему посвящено большое число публикаций [11-14]. Однако существующие методы имеют существенные ограничения при идентификации дефектов в нелинейных робототехнических объектах.

В работах [15, 16] для решения задачи точной идентификации возникающих дефектов в многозвенных манипуляторах, описываемых нелинейными уравнениями, предложено вводить в СДД, синтезированные на основе логико-динамического подхода [17], обратные связи по сигналу невязки. Использующие такую обратную связь СДД обеспечивают точное определение величин выявляемых дефектов, но только в том случае, когда эти системы описываются дифференциальными уравнениями первого порядка. Однако, логико-динамический подход не гарантирует получение наблюдателей первой размерности. Кроме того, в случае если не все переменные состояния объекта диагностирования измеряются соответствующими датчиками получаемые СДД будут уже описываться нелинейными уравнениями второго порядка и выше, когда указанный метод не может быть использован. Поэтому проблема разработки легко реализуемых ССД для многозвенных манипуляторов, по-прежнему остается важной и актуальной.

Таким образом, в докладе ставится и решается задача разработки нового легкореализуемого метода синтеза ССД для электроприводов многозвенных манипуляторов, описываемых нелинейными дифференциальными уравнениями, которые позволяют обеспечить обнаружение и идентификацию величин возникающих типовых дефектов в реальном масштабе времени без использования дополнительных датчиков, измеряющих все элементы вектора состояния указанных электроприводов.

Описание метода синтеза ССД для обнаружения и идентификации дефектов

В общем случае электроприводы многозвенных манипуляторов могут быть описаны системой нелинейных дифференциальных уравнений, которая в матричной форме имеет вид:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A\,x(t) + B\,u(t) + G(x(t), u(t)) + L\,d(t), \\ y(t) &= C\,x(t), \end{aligned} \tag{1}$$

где $x(t) \in R^n$ – вектор состояния электропривода; $y(t) \in R^m$ – измеряемые датчиками переменные состояния ($m \le n$); $u(t)$ – управление; $d(t) \in R^p$ – вектор дефектов (при отсутствии дефектов все элементы вектора $d(t)$ равны нулю, а при появлении дефекта конкретный элемент становится ненулевым); $A \in R^{n \times n}$ – матрица динамических свойств электропривода; $B \in R^n$ – вектор коэффициентов усиления при управляющих воздействиях; $C \in R^{m \times n}$ – матрица выхода, связывающая вектор состояния электропривода с вектором измерений; $L \in R^{n \times p}$ – матрица дефектов, указывающая место возникновения дефекта; $G \in R^n$ – вектор, определяющий нелинейную часть системы; n – количество переменных состояния (порядок системы); p – количество дефектов, которые могу возникнуть в системе; m – количество датчиков, измеряющих переменные состояния системы.

Как отмечалось ранее задачу обнаружения дефектов и определения их величин предлагается решать на основе логико-динамического подхода [17], который при построении ССД позволяет использовать только линейные методы. В этом подходе при синтезе ССД выполняются следующие процедуры [17]:

1) переход от нелинейной модели объекта диагностирования (1) к его линейной логико-динамической модели;

2) синтез банка диагностических наблюдателей (ДН) для полученной линейной модели; при этом каждый наблюдатель в синтезированном банке должен быть чувствителен только к одному определенному дефекту и нечувствителен к остальным;

3) определение нелинейных составляющих и добавление их к построенным линейным ДН.

В результате каждый нелинейный ДН в общем виде будет описываться следующими уравнениями [17]:

$$\begin{aligned} \dot{x}^*(t) &= A^* x^*(t) + B^* u(t) + G^*(x^*(t), u(t), y(t)) + J\, y(t), \\ y^*(t) &= C^* x^*(t), \end{aligned} \tag{2}$$

где $x^*(t) \in R^k$ – вектор состояния ДН ($k \le n$); $y^*(t)$ – выходной сигнал ДН; $A^* \in R^{k \times k}$ – матрица динамических свойств ДН; $B^* \in R^k$ – вектор, учитывающий управление $u(t)$ в ДН; $C^* \in R^k$ – вектор, связывающий $x^*(t)$ с $y^*(t)$; $G^* \in R^k$ – вектор, учитывающий нелинейную часть системы в ДН; $J \in R^{k \times m}$ – матрица, учитывающая $y(t)$ в ДН; k – количество переменных состояния ДН (порядок ДН).

При построении ДН (2) матрица A^* и вектор C^* обычно задаются в виде: $A^* = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}$, $C^* = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}$, а матрицы B^* и J, вектор G^*, а также порядок ДН определяются по известным процедурам, подробно описанным в работах [17]. При этом предполагается, что при отсутствии дефектов должны выполняться следующие равенства

$$x^*(t) = \Phi x(t),\ B^* = \Phi B,\ H C = C^* \Phi,\ \Phi A = A^* \Phi + J C,\ G^* = \Phi G, \tag{3}$$

где матрица $\Phi \in R^{k \times n}$ и вектор $H \in R^m$ обеспечивают связь между векторами состояния электропривода (1) и ДН (2), а также их выходами и определяются в ходе синтеза ДН.

Важно отметить, что если $n \ne m$, то порядок k полученного конкретного ДН (2) может быть выше первого.

Невязка $r(t)$, указывающая на отсутствие или появление дефекта в электроприводе, формируется ДН (2) следующем образом [17]

$$r(t) = H\, y(t) - y^*(t) = H C\, x(t) - C^* x^*(t) = C^* \Phi\, x(t) - C^* x^*(t) = C^* e(t), \tag{4}$$

где $e(t) = \Phi x(t) - x^*(t) \in R^k$ – вектор рассогласования переменных состояния электропривода и ДН.

Для дальнейшего решения задачи идентификации дефектов при синтезе ССД необходимо определить связь между невязкой $r(t)$ и дефектом $d_i(t)$, которому чувствителен построенный наблюдатель ($i=\overline{1,p}$). Для этого продифференцируем выражение (4) с учетом (1) и (2). В результате, с учетом вида вектора C^* и выражения (4), можно получить:

$$\dot{e}(t) = A^* e(t) + \Phi G(x(t),u(t)) - G^*(x^*(t),u(t),y(t)) + \Phi L\, d(t). \qquad (5)$$

Из выражения (5) видно, что в частном случае, если размерность ДН равна 1 (т.е. $y(t)=x(t)$), при появлении дефекта всегда будут выполнятся следующие условия: 1) $A^*=0$, 2) $e(t)=r(t)\in R^1$, 3) $G^*(u(t),y(t)) = \Phi G(x(t),u(t))$. В этом случае введение простой обратной связи, пропорциональной невязке $r(t)$ позволит определить величину возникающего дефекта $d(t)$ [15, 16].

Однако для случая, если размерность ДН выше первой, вектор $G^*(x^*(t),u(t),y(t))$ будет зависеть от $x^*(t)$, т.е. при появлении дефекта $G^*(x^*(t),u(t),y(t))^* \neq \Phi G(x(t),u(t))$, т.к. $x^*(t)\neq \Phi x(t)$. Кроме того, в выражении (5) будут неизвестны составляющая $A^* e(t)$. В результате не удается с помощью указанной обратной связи определить величину возникающего дефекта с помощью ДН (2).

Таким образом, возникает задача разработки процедуры идентификации дефектов, определяемых многомерными ДН. Для этого перепишем уравнение (5) в следующем общем виде

$$\begin{aligned}
&\dot{e}_1 = e_2 + a_1,\\
&\dot{e}_2 = e_3 + a_2,\\
&\ldots\\
&\dot{e}_v = e_{v+1} + f_v d_i + a_v,\\
&\ldots\\
&\dot{e}_k = a_k,
\end{aligned} \qquad (6)$$

где a_v соответствующий элемент вектора $\Phi G(x(t),u(t)) - G^*(x^*(t),u(t),y(t))^*$, $v=\overline{1,k}$, f_v - v-ый элемент вектора ΦL.

Анализ выражения (6) показывает, что определение величины дефекта возможно если ввести такую обратную связь по сигналу невязки, которая обеспечит обнуление всех элементов вектора $e(t)$. В этом случае, всегда будет выполняться равенство $x^*(t)=\Phi x(t)$ и, следовательно, $G^*(x^*(t),u(t),y(t))^* = \Phi G(x(t),u(t))$. При этом ДН должен быть построен таким образом, чтобы все элементы вектора a, кроме a_v были равны 0, т.е. ДН должен быть нечувствителен ко всем элементам вектора $\Phi G(x(t),u(t)) - G^*(x^*(t),u(t),y(t))^*$, кроме того, который соответствует уравнению, в которое входит определяемый дефект.

Для обнуления всех элементов вектора $e(t)$ за конечный промежуток времени в случае возникновения дефекта $d_i(t)$ в v-ое уравнение ДН предлагается ввести сигнал обратной связи $z(e_1)$, который обеспечит работу ДН в скользящем режиме [9, 10].

С учетом сказанного, систему (6) при отсутствии начального рассогласования начальных условий между ДН (1) и электроприводом (1) можно переписать в виде:

$$\begin{aligned}
&\dot{e}_1 = e_2,\\
&\dot{e}_2 = e_3,\\
&\dot{e}_3 = e_4,\\
&\ldots\\
&\dot{e}_v = f_v d_i + a_v - z(e_1).
\end{aligned} \qquad (7)$$

Согласно [9, 10] $z(e_1)$ может быть выбрана следующим образом:

$$z(e_1) = z_0 sign(S), \tag{8}$$

где $S = e_1 + c_1\dot{e}_1 + c_2\ddot{e}_1 + ... + c_{v-1}e_1^{(v-1)}$, $c_1,..,c_{v-1}$ – положительные коэффициенты.

Тогда для существования скользящего режима необходимо выполнения условия:

$$S\dot{S} \le 0. \tag{9}$$

С учётом (7), (8) и (9) можно получить:

$$S\dot{S} = S(\dot{e}_1 + c_1\ddot{e}_1 + ... + c_{v-1}e_1^{(v)}) = S(\dot{e}_1 + c_1\ddot{e}_1 + ... + c_{v-1}(f_v d_i + a_v) - c_{v-1}z(e_1)). \tag{10}$$

Таким образом для выполнения условия (10) необходимо чтобы:

$$\dot{e}_1 + c_1\ddot{e}_1 + ... + c_{v-1}(f_v d_i + a_v) < c_{v-1}z(e_1) \text{ при } S > 0;$$
$$\dot{e}_1 + c_1\ddot{e}_1 + ... + c_{v-1}(f_v d_i + a_v) > c_{v-1}z(e_1) \text{ при } S < 0.$$

Тогда z_0 должна удовлетворять условию:

$$z_0 \ge \left| \frac{\dot{e}_1 + c_1\ddot{e}_1 + ... + c_{v-1}(f_v d_{i\max} + a_{v\max})}{c_{v-1}} \right|,$$

и закон обратной связи в ДН (7) при этом примет вид:

$$z(e_1) = \left(\left| \frac{\dot{e}_1 + c_1\ddot{e}_1 + ... + c_{v-2}e_1^{(v-1)}}{c_{v-1}} \right| + \left| f_v d_{i\max} + a_{v\max} \right| \right) \text{sign}(S). \tag{11}$$

После введения сигнала обратной связи (11) динамика ДН будет описываться уравнением $S = 0$. Тогда коэффициенты $c_1,..,c_{v-1}$ можно подобрать таким образом, чтобы обеспечить желаемые корни характеристического уравнения: $1 + c_1\lambda_1 + c_2\lambda_2 + ... + c_{v-1}\lambda_{v-1} = 0$.

При использовании обратной связи указанного вида, вектор рассогласования $e(t)$ достигнет нуля за конечный промежуток времени и сигнал $z(e_1)$ полностью компенсирует воздействие дефекта на систему, а величина дефекта может быть определена ССД следующим образом:

$$d_i = z_{eq} / f_v \ , \tag{12}$$

где z_{eq} – величина, эквивалентная сигналу $z(e_1)$.

Таким образом, за счет введения в каждый синтезированный ДН обратной связи по сигналу невязки, обеспечивающей работу наблюдателя в скользящем режиме, удается обеспечить точное определение величин возникающих электроприводах дефектов.

Исследование работы синтезированных ССД с обратной связью

Для проверки работоспособности и эффективности предлагаемого метода было проведено моделирование работы синтезированной ССД для электропривода второй переносной (координата q_2) степени подвижности шестистепенного манипулятора типа PUMA, показанного на рис. 1. На этом рисунке введены следующие обозначения m_i – масса звена i; m_Γ – масса груза (или рабочего инструмента), находящегося в схвате; l_i – длина звена i; l_i^* – расстояние от шарнира вращения звена i до его центра масс; q_i – угол поворота i-го сочленения; $i = \overline{1,6}$ – номер сочленения манипулятора.

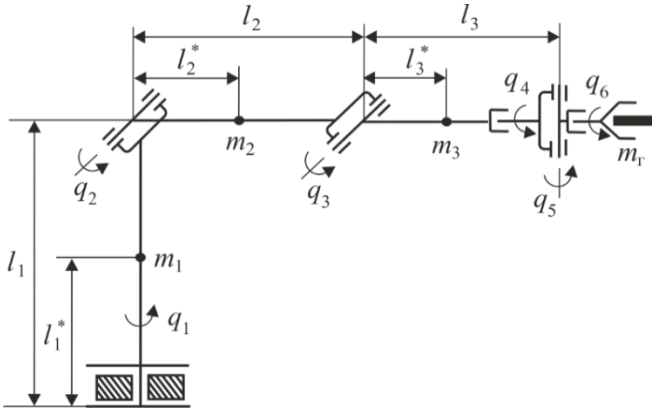


Рисунок 1 – Кинематическая схема манипулятора типа PUMA

Электропривод второй степени подвижности манипулятора, с учётом взаимовлияний между его степенями подвижности и упругости механической передачи может быть описан уравнением вида (1) и матрицами:

$$A=\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -c_ж i^2/H & -(k_{вр}+h)/H & c_ж i/H & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ c_ж i/J & 0 & -c_ж/J & -k_{вд}/J_д & k_м/J_д \\ 0 & 0 & 0 & -k_ω/L & -R/L \end{bmatrix},\ L=\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T,$$

$$x=\begin{bmatrix} a_р \\ \dot{a}_р \\ a_д \\ \dot{a}_д \\ I \end{bmatrix},\ G(x(t))=\begin{bmatrix} 0 \\ (-M_E-\mathrm{M}_{стр0}\ sign(x_2)+c_ж i\hat{f}_л(\delta))/H \\ 0 \\ (-M_{стд0}\ sign(x_4)-c_ж\hat{f}_л(\delta))/J_д \\ 0 \end{bmatrix},\ B=\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ k_y/L \end{bmatrix},\ C=\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

где I – ток якоря; $\dot{a}_д$ – скорость вращения ротора электродвигателя; $a_д$ угол поворота ротора электродвигателя; $\alpha_р$ – угол поворота выходного вала редуктора; $\dot{a}_р$ – скорость вращения выходного вала редуктора; i – передаточное отношение редуктора; L – индуктивность цепи якоря; $k_ω$ – коэффициент противо-э.д.с.; k_y – коэффициент усиления усилителя мощности; $k_{вр}$ – коэффициент вязкого трения редуктора; $k_{вд}$ – коэффициент вязкого трения двигателя; $k_м$ – коэффициент крутящего момента; $J_д$ – момент инерции вала электродвигателя и вращающихся частей редуктора; H, h, M_E – приведенные к выходному валу редуктора переменные составляющие всех моментных воздействий на электроприводы, включая взаимовлияния между всеми степенями подвижности многозвенника; $c_{ж}$ – жёсткость механической передачи; $\delta=a_д-ia_р$; $\hat{f}_л(\delta)$ – нелинейная характеристика люфта в механической передаче, такая, что: $\hat{f}_л(\delta)=\sigma$, при $\delta<-\sigma$; $\hat{f}_л(\delta)=-\delta$, при $-\sigma\le\delta\le\sigma$; $\hat{f}_л(\delta)=-\sigma$, при $\delta>\sigma$; 2σ – величина люфта в механической передаче.

Для второй степени подвижности эффекты взаимовлияния в модели описываются следующими уравнениями [18]

$$H=\frac{1}{i^2}\{J_{n2}+J_{n3}+m_2l_2^{*2}+m_3l_3^{*2}+(m_3+m_г)l_2^2+m_гl_3^2+2l_2(m_3l_3^*+m_гl_3)\cos q_3\},$$

$$h=\frac{-2l_2(m_3l_3^*+m_гl_3)\dot{q}_3\sin q_3}{i^2},$$

$$M_{\text{Е}} = \frac{1}{i}\{[J_{n3} + m_3 l_3^{*2} + m_{\text{г}} l_3^2 + (m_3 l_3^* + m_{\text{г}} l_3) l_2 \cos q_3]\ddot{q}_3 - l_2(m_3 l_3^* + m_{\text{г}} l_3)\dot{q}_3^2 \sin q_3 +$$

$$+ g[m_2 l_2^* + (m_3 + m_{\text{г}}) l_2]\sin q_2 + g(m_3 l_3^* + m_{\text{г}} l_3)\sin(q_2 + q_3) - \frac{1}{2}[(J_{n2} - J_{s2} + m_2 l_2^{*2} +$$

$$+ (m_3 + m_{\text{г}}) l_2^2)\sin 2q_2 + (J_{n3} - J_{s3} + m_3 l_3^{*2} + m_{\text{г}} l_3^2)\sin 2(q_2 + q_3) + 2l_2(m_3 l_3^* + m_{\text{г}} l_3)\sin(2q_2 + q_3)]\dot{q}_1^2\},$$

где J_{si} – момент инерции звена i относительно его продольной оси; J_{ni} – момент инерции звена i относительно поперечной оси, проходящей через его центр масс; g – ускорение свободного падения.

При моделировании принимались следующие значения параметров звеньев манипулятора в данном описании взаимовлияний: $m_1 = 35.8$ кг, $m_2 = 3.5$ кг, $m_3 = 3$ кг, $l_1 = 0.2$ м, $l_2 = 0.5$ м, $l_3 = 0.4$ м, $l_1^* = 0.1$ м, $l_2^* = 0.12$ м, $l_3^* = 0.1$ м, $J_{s1} = 0.32$ кг·м^2, $J_{n2} = 0.12$ кг м^2, $J_{s2} = 0.0047$ кг м^2, $J_{s3} = 0.004$ кг м^2, $J_{n3} = 0.067$ кг м^2, $m_{\text{г}} = 0.5$ кг; а также следующие параметры электропривода: $J_{\partial} = 0.0001$ кгмс^2, $\sigma = 0.1$, $c_{ж} = 1$, $k_{\omega} = 0.02$ Вс, $k_{\text{у}} = 100$, $R = 0.4$ Ом, $L = 0.004$ Гн, $k_{\text{м}} = 0.02$ Нм/А, $i = 100$ $k_{вд} = k_{вр} = 0.005$ Нмс/рад, $M_{\text{стд0}} = M_{\text{стр0}} = 0.06$ Нм.

Предполагается, что в электроприводе возможны следующие типовые дефекты: 1) дефект $d_1(t) = -\dfrac{\tilde{M}_{стр0}}{H} sign(x_2)$, обусловленный изменением коэффициента сухого трения редуктора электропривода; 2) дефект $d_2(t) = -\dfrac{\tilde{M}_{стд0}}{J_{\partial}} sign(x_4)$, обусловленный изменением коэффициента сухого трения якоря двигателя; 3) дефект $d_3(t) = -\dfrac{\tilde{R}}{L} I$, обусловленный изменением электрического сопротивления цепи якоря электродвигателя.

При моделировании на электропривод подавались следующие входные воздействия: $\alpha_{\text{р}}^{\text{ж}} = \sin 0.5t$, $q_1 = \sin t$, $q_3 = \sin(0.7t)$.

ДН, чувствительный к дефекту $d_1(t)$, и инвариантный к остальным, описывается системой уравнений вида (2) и следующими матрицами:

$$\Phi = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ (k_{вр} + h)/H & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_{\text{ж}} i/H & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad J = \begin{bmatrix} -(k_{вр} + h)/H & 0 & 0 \\ -c_{\text{ж}} i^2/H & 0 & 0 \\ 0 & c_{\text{ж}} i/H & 0 \end{bmatrix}, \quad G^* = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \; C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$F^* = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \qquad B^* = \begin{bmatrix} 0 \\ -\dfrac{M_E + \text{M}_{стр0}\ sign(x_2) - c_{\text{ж}} i \hat{f}_{л}(\delta)}{H} \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Так как $\Phi L_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}^T$, дефект d_1 не оказывает влияния на третье уравнения наблюдателя, поэтому сигнал обратной связи $z(e_1) = \left(\dfrac{\dot{e}_1}{c_1} + \left| d_{1\max} + \dfrac{c_{ж} i \sigma}{H} \right| \right) sign(e_1 + c_1 \dot{e}_1)$, должен быть введён во второе уравнение наблюдателя. Блок-схема полученной ССД, обеспечивающей обнаружение и идентификацию дефекта $d_1(t)$, представлена на рис. 2.

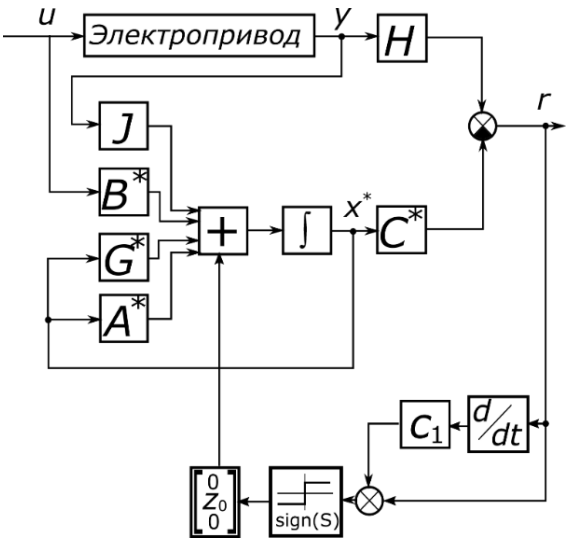


Рисунок 2 – Блок-схема ССД

При моделировании этот дефект имитировался скачкообразным изменением величины момента сухого трения на величину $\tilde{M}_{стр0}$ = 0.02 Нм (рис. 4) в период с t = 2 с до t = 4 с и добавлением к величине момента сухого трения величины $\tilde{M}_{стр0} = 0.02sin(0.5t)$ (рис. 4).

На рис. 3 и 4 представлены результаты работы предложенной системы ССД. Из этих рисунков можно видеть, что ССД позволяет своевременно определять факт появления дефекта, а также точно оценить его величину. Аналогичные результаты были получены и для других типов возникающих дефектов, а также для электроприводов, установленных в других степенях подвижности указанного манипулятора.

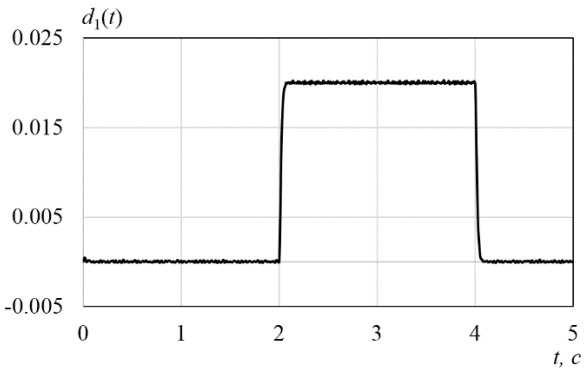


Рисунок 3 – Результат идентификации величины постоянного дефекта

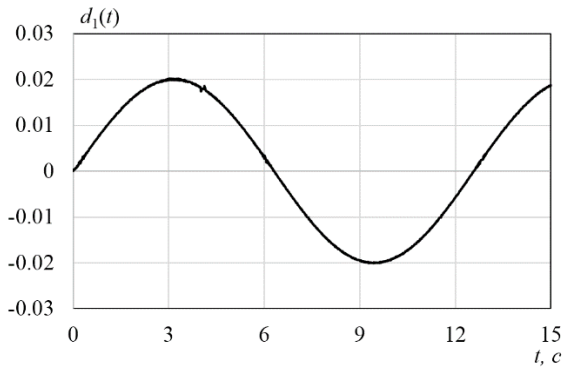


Рисунок 4 – Результат идентификации величины переменного дефекта

Таким образом, результаты проведенного математического моделирования полностью подтвердили работоспособность и высокую эффективность предложенного метода синтеза ССД для электроприводов многозвенных манипуляторов, описываемых нелинейными дифференциальными уравнениями, которые позволяют обеспечить обнаружение и идентификацию величин возникающих типовых дефектов в реальном масштабе времени без использования дополнительных датчиков, измеряющих все элементы вектора состояния указанных электроприводов.

Заключение

В работе предложен эффективный метод синтеза систем диагностирования типовых дефектов, появляющихся в электроприводах многозвенных манипуляторов, описываемых нелинейными дифференциальными уравнениями. Разработанный метод основан на использовании диагностических наблюдателей, построенных с помощью логико-динамического подхода, позволяющего применять линейные методы при диагностировании нелинейных объектов. Для точного определения в реальном

масштабе времени величин дефектов в наблюдатели, которые в общем случаем могут быть произвольной размерности, предложено вводить специальную обратную связь по сигналу невязки, которая обеспечивает работу наблюдателя в скользящем режиме.

На примере определения и идентификации дефектов, возникающих в электроприводах многозвенного манипулятора, показана работоспособность и эффективность предложенного метода.

Исследование было поддержано грантом Президента РФ (МК-1987.2018.8) и грантами РФФИ (16-29-04195, 16-07-00300).

1. Blanke M., Kinnaert M, Lunze J., Staroswiecki M. Diagnosis and Fault-Tolerant Control. Berlin: Springer-Verlag, 2006.
2. Ding S. Data-driven Design of Fault Diagnosis and Fault-tolerant Control Systems. London: Springer-Verlag, 2014.
3. Мироновский Л.А. Функциональное диагностирование динамических систем. М.-СПб.: МГУ-ГРИФ, 1998.
4. Simani S., Fantuzzi C., Patton R. Model-based Fault Diagnosis in Dynamic Systems Using Identification. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2002.
5. Isermann R., Balle P. Trends in the application of model based fault detection and diagnosis of technical processes // Proc. of the 13th World Congress IFAC, USA, San Francisco, 1996, pp. 1-12.
6. Patton R., Frank P., Clark R. Issue of Fault Diagnosis for Dynamic Systems. Springer-Verlag, 2000.
7. Филаретов В.Ф. Самонастраивающиеся системы управления приводами манипуляторов. – Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2000.
8. Зуев А.В., Филаретов В.Ф. Особенности создания комбинированных позиционно-силовых систем управления манипуляторами // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2009. № 1. С. 154-162.
9. Теория систем с переменной структурой /С. В. Емельянов, В. И. Уткин, В. А. Таран и др./ Под ред. С. В. Емельянова. М.: Наука, 1970.
10. Уткин В. И. Системы с переменной структурой: состояние, проблемы и перспективы // Автоматика и телемеханика.1983. № 9. С. 5-26.
11. Edwards C., Spurgeon S., Patton R. Sliding Mode Observers for Fault Detection and Isolation // Automatica. 2000. V. 36. P. 541-553.
12. Floquet T., Barbot J., Perruquetti W., Djemai M. On the Robust Fault Detection via a Sliding Mode Disturbance Observer// Int. J. Control. 2004. V. 77. P. 622–629
13. Halim Alwi H., Edwards C. Fault Tolerant Control Using Sliding Modes with On-line Control Allocation // Automatica. 2008. V. 44. P. 1859-1866.
14. Kalsi K., Hui S., Zak S. Unknown Input and Sensor Fault Estimation Using Sliding-Mode Observers // Proc. of the 2011 American Control Conf. San Francisco, USA, 2011, pp. 1364-1369.
15. Filaretov V., Zhirabok A., Zuev A., Procenko A. Synthesis method of fault tolerant control system for manipulators // Advanced Materials Research. 2013. Vol. 717. P. 551-556.
16. Филаретов В.Ф., Жирабок А.Н., Зуев А.В., Проценко А.А. Разработка метода синтеза системы аккомодации к дефектам в электроприводах манипуляционных роботов // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2013. № 4. Т. 11. С.26-33.
17. Жирабок А.Н., Усольцев С.А. Линейные методы при диагностировании нелинейных систем – Автоматика и телемеханика. 2000. № 7. С. 149-159.
18. Филаретов В.Ф., Жирабок А.Н., Никифоров М.А. Разработка самонастраивающихся регуляторов для электроприводов многозвенных манипуляторов со сложной кинематической схемой – Мехатроника, автоматизация, управления. 2002. № 4. С. 2–7.

V.L. Afonin, A.N. Smolentsev, M.G. Yakovlev

INTELLIGENT ROBOTIC COMPLEX FOR FINISHING COMPLEX SURFACES

Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of RAS, Moscow
afoninwl@rambler.ru

В.Л. Афонин, А.Н. Смоленцев, М.Г. Яковлев

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ ДЛЯ ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКИ СЛОЖНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

ИМАШ РАН, Москва
afoninwl@rambler.ru

Аннотация

В предлагаемом докладе дается описание технологической операции финишной обработки проточной части пера лопаток ГТД. На основе анализа технологической операции дается обоснование необходимости интеллектуального управления для робототехнического комплекса, выполняющего финишную операцию. Это обосновывается тем, что каждую заготовку, поступающую на операцию финишной обработки, необходимо измерить, определить геометрические размеры и качество предварительной обработки. На основе полученной информации для каждой заготовки назначается индивидуальная программа финишной обработки проточной части пера лопатки.

Лопатки – самая массовая и ответственная деталь ГТД (рис.1). Газотурбинные двигатели используются не только в военной и гражданской авиации. Газовые и паровые турбины, энергетические стационарные и передвижные установки, газоперекачивающие станции широко применяются в промышленности и на транспорте. Данное оборудование используется, в судостроении в качестве корабельных газотурбинных установок, в энергетическом машиностроении, в газовой промышленности на газоперекачивающих установках.

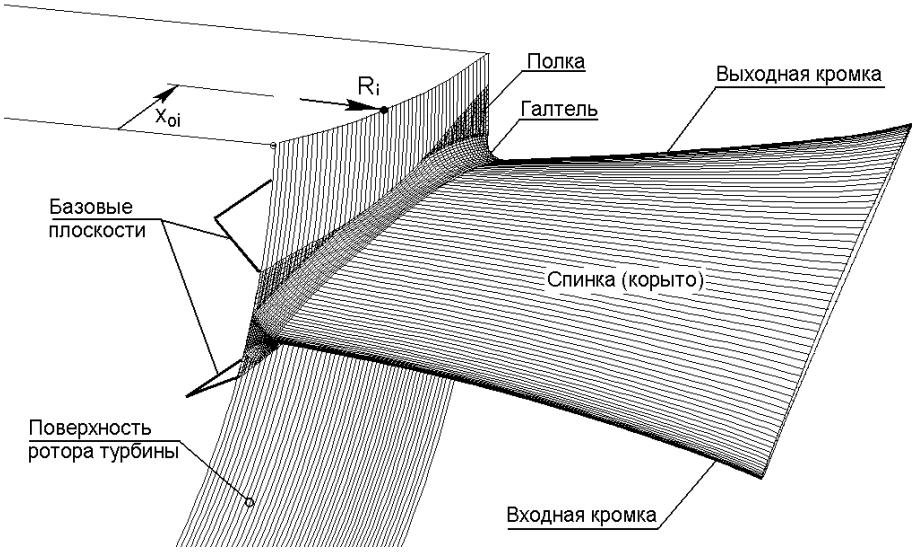


Рисунок 1– Типовая лопатка газотурбинного двигателя

Поэтому разработки и применение робототехнических комплексов на операциях обработки пера лопаток ГТД для авиационных двигателей найдут также широкое применение в гражданской промышленности для газовых и паровых турбин, энергетических стационарных и передвижных установок и, газоперекачивающих станций.

От качества изготовления лопаток в решающей мере зависит эффективность работы ГТД, достижение стабильности эксплуатационных характеристик, долговечность и надежность. Так современный ГТД авиационного двигателя насчитывает до 3000 и более лопаток 20–30 типоразмеров,

длиной от 12 до 1000 мм. Материалами для лопаток компрессоров служат трудно обрабатываемые жаропрочные, жаростойкие высоколегированные и титановые сплавы.

Изготовление лопаток авиационных двигателей по трудоемкости составляет до 30% общей трудоемкости изготовления ГТД. В свою очередь, в общей трудоемкости изготовления лопаток большой объем (до 45%) занимают финишные ручные полировальные доводочные работы, которые требуют квалифицированных и высокооплачиваемых рабочих.

Следует отметить, что ручные полировальные доводочные операции – это вредные для здоровья работы, которые приводят к профессиональным заболеваниям рабочих силикозом и виброболезнью.

Прогрессивные технологические процессы предполагают дифференцированные методы обработки элементов лопаток ГТД.

Предварительная обработка проточных поверхностей лопаток осуществляется в зависимости от материалов лопаток и их габаритов: фрезерованием, литьем, штамповкой, вальцеванием, круговой электрохимической обработкой. Трудоемкость данных операций достигает 30–40 минут в зависимости от габаритов лопаток

Но ни один из данных способов обработки не позволяет получить полностью готовую деталь. Для получения готовой детали требуется выполнить финишные операции шлифование и полирование, которые включают либо полную обработку пера, либо отдельных участков пера: полок, кромок, прикомлевого участка.

После предварительных операций нельзя получить все участки пера лопаток с одним минимально возможным допуском. Так на угол закрутки из–за ажурности пера (особенно это относится к авиационным двигателям 5-го поколения) и его деформации после предварительной обработки приходится назначать большой допуск. Одновременно входная и выходная кромки, усилительные полки требуется выполнять с высокой точностью (минимальный допуск).

Изложенная выше проблема не позволяет выполнять операцию финишной обработки в автоматическом режиме по одной программе даже партии деталей. Для автоматизации данных операций требуется для каждой заготовки, поступающей на финишную операцию, измерить геометрию сложной пространственной поверхности проточной части детали, определить качество поверхности, вписать в нее готовую деталь и для этой детали назначить индивидуальную программу обработки и режимы обработки.

Подобную высокоинтеллектуальную операцию в настоящее время во всем мире способны выполнять только квалифицированные специалисты. Данные специалисты должны иметь, в некотором смысле, природные данные (отсутствие повышенного тремора рук, спокойный характер). Малейшие погрешности могут привести к браку на финише изготовления дорогой и ответственной детали.

С учетом вредности и ответственности изготовления пера лопаток рабочие, выполняющие операции шлифования и полирования, во всем мире являются самые высоко оплачиваемые, имеют возможность выхода на пенсию в одинаковом возрасте со специалистами, работающим на атомных установках.

С учетом изложенного выше, для автоматизации финишных операций обработки пера лопаток ГТД должна быть разработана *интеллектуальная робототехническая система*, способная распознавать геометрию и качество сложной пространственной поверхности с помощью встроенных высокоточных дистанционных систем контроля, контролировать технологический процесс, выбирать оптимальное управление и формировать программу обработки, выполняемую роботом для каждой индивидуальной детали.

Цель автоматизации операций финишной обработки проточной части пера лопаток ГТД состоит в создании интеллектуальных робототехнических комплексов, включающих встроенный контроль технологических параметров, геометрических размеров и получение готовых изделий с заданным качеством без участия человека.

Интеллектуальная экспертная система, основанная на правилах для управления технологическим комплексом финишных операций обработки пера лопаток ГТД

Интеллектуальная технологическая система представляет собой в общем случае экспертную систему, содержащую переменную настраиваемую модель внешнего мира и реальную исполнительную систему с объектом управления (рисунок 2). Цель и управляющие воздействия формируются в такой системе на основе знаний о внешней среде, объекте управления и на основе

моделирования ситуаций в виртуальном мире, которые в дальнейшем реализуются реальной системой. Внешней средой для технологической системы является непосредственно технологический процесс, выполняемый системой управления.

Интеллектуальную технологическую систему можно представить состоящей из двух подсистем – *высшего и низшего уровней* (рисунок 2). Подсистема управления высшего уровня выполняет функции хранения информации об обрабатываемом изделии, технологическом процессе, задачах, выполняемых обрабатывающим оборудованием. Основная задача, стоящая перед данной подсистемой - это проверка на комплексной модели процесса обработки и выбор управляющей программы, которую должна выполнить реальная исполнительная система в реальном времени. Управление всем комплексом осуществляется от единой вычислительной системы, которая может быть включена в единую вычислительную сеть.

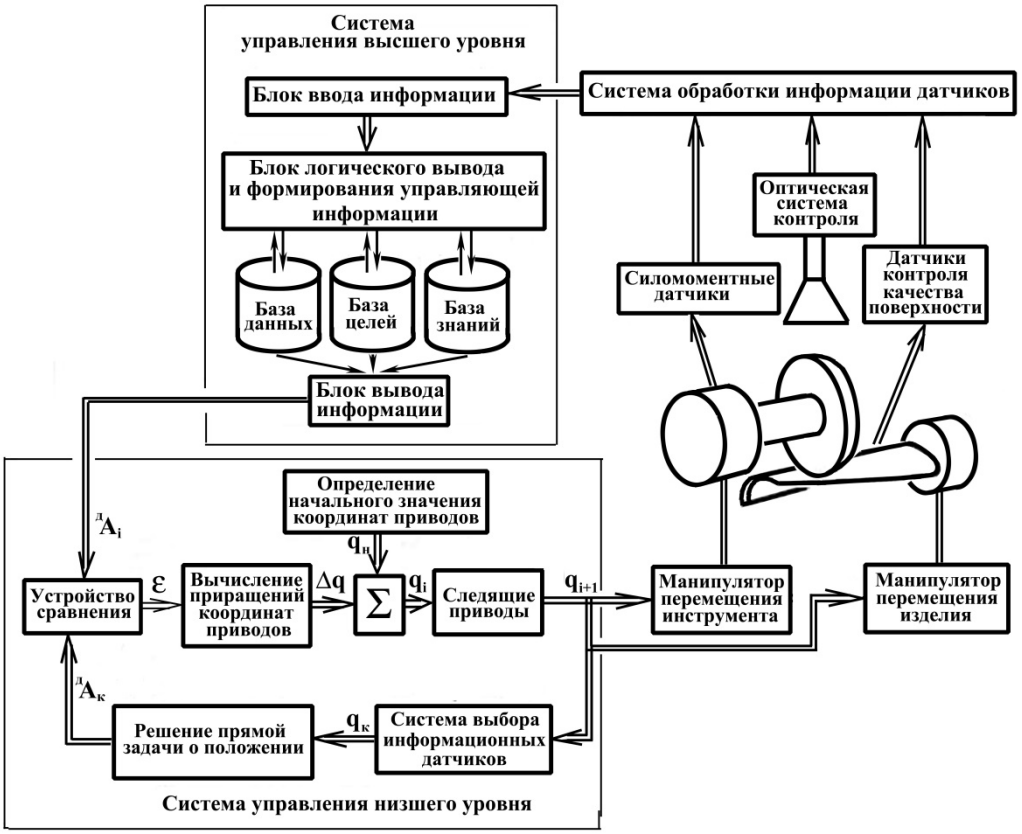


Рисунок 2 – Интеллектуальная технологическая система

Входом системы высшего уровня (рисунок 2) является *Блок ввода информации*, куда поступают числовые данные с датчиков контроля. В качестве устройств контроля используются датчики, определяющие усилия резания, датчики, позволяющие контролировать качество поверхности, встраиваемая оптическая система, предназначена для определения геометрических размеров поступающей на обработку заготовки, а также получаемой после обработки готовой детали.

Далее информация поступает в *Блок логического вывода*, либо сразу в базу данных. *База данных* (БД) - это совокупность таблиц, хранящих, как правило, символьную и числовую информацию о технологическом процессе, обрабатываемых изделиях, исполнительных механизмах робота-станка, инструменте и др.

Блок логического вывода и формирования управляющей информации обеспечивает нахождение решений для нечетко формализованных задач и выдачу информации для пользователя и для управления исполнительными механизмами станка. Данный блок на основе *Базы знаний* (БЗ), *Базы данных* (БД), *Базы целей* (БЦ) и *Блока алгоритмических методов решений* формирует программу управления станком для выполнения технологической операции.

При формировании программы обработки криволинейной поверхности пера лопатки требуется обеспечивать:

– компенсацию упруги х деформаций детали и рабочих органов обрабатывающего оборудования;

– переопределение геометрических размеров шлифовального круга после его правки;

– определение возможности появления автоколебаний технологической системы, их причин и поиск путей их устранения;

– вписывание геометрической модели конечного изделия в геометрическую модель заготовки с целью определения снимаемых припусков;

– определение траектории движения обрабатывающего инструмента для формирования сложной поверхности изделия.

Таким образом, для каждой лопатки, поступающей на финишную обработку, необходимо корректировать программу обработки пера. Поэтому система должна обладать определенной интеллектуальностью, связанной, в частности, с возможностью принятия решений по необходимой корректировке программ обработки на основе информации, поступающей от системы контроля.

Экспертная система строится на основе правил (таблица 1). В качестве правил рассматривается набор обязательных действий, которые проверяются и корректируются на основе информации систем контроля о характеристиках обрабатываемой детали и исполнительной системы. На основании этого формируется программа обработки конкретной лопатки.

Таблица 1. Набор правил для интеллектуальной экспертной системы

№ п/п	Правила для экспертной системы, выполняющей финишную обработку пера лопаток	Критерии оценки выполнения этапов экспертной системой	Результаты выполнения этапов экспертной системой
1	Измерение геометрических параметров обрабатываемой поверхности заготовки	Минимизация погрешностей измерения	Геометрические параметры обрабатываемой поверхности заготовки
2	Вписание готовой детали в параметры заготовки	Минимизация припусков на обработку	Геометрические параметры обработанной поверхности готовой детали, соответствующие анализируемой заготовке
3	Построение эквидистантных оболочек	Минимизация количества проходов инструмента	Карта распределения припусков, значения эквидистантных расстояний, глубины резания.
4	Построение зон черновой и чистовой обработки на обрабатываемой поверхности	Минимизация площади обрабатываемых поверхностей черновой обработки для выбранных припусков	Построенные границы зон черновой и чистовой обработки
5	Назначение черновых и чистовых траекторий обработки	Минимизация времени на обработку	Массив траекторий для черновой и чистовой обработки
6	Назначение режимов черновой и чистовой обработки	Максимальная производительность, обеспечивающая допустимые погрешности получения готовой детали	Закон изменения подачи, допустимые скорости резания,

№ п/п	Правила для экспертной системы, выполняющей финишную обработку пера лопаток	Критерии оценки выполнения этапов экспертной системой	Результаты выполнения этапов экспертной системой
7	Проверка сформированных законов движения на комплексной модели процесса обработки	Контроль допустимых погрешностей на размеры обрабатываемой поверхности детали	Погрешности отработки траекторий движения инструмента
8	Корректировка сформированных законов движения инструмента по обрабатываемой поверхности	Правила корректировки законов движения	Погрешности отработки траекторий движения инструмента

Планирование движения

Перед началом планирования программы обработки заготовка автоматически распознается измерительной подсистемой робота−станка (рис.3). Структурная схема интеллектуальной технологической системы управления робота−станка приведена на рисунке 3.

Работа системы планирования движений осуществляется в соответствии с алгоритмом (рис.4). Первым этапом работы системы планирования движений (СПД) является геометрический анализ заготовки. Решается задача «вписания», т.е. проверяется возможность получения конечного изделия из имеющейся заготовки и достигается максимально возможная равномерность распределения припуска для текущей заготовки. Производится формирование карты распределения припуска по поверхности изделия и разбиение поверхности изделия на зоны в зависимости от количества проходов, требуемых для удаления (съема) припуска. Последовательная обработка зон позволяет минимизировать ошибку обработки, связанную со скачками сил резания из−за неравномерности припуска.

Следующим этапом работы СПД является формирование траекторий движения инструмента по поверхности изделия. На выходе подсистемы формирования траекторий получаем массивы траекторий для определенных зон (в случае черновых проходов) и массив траекторий для всей поверхности изделия.

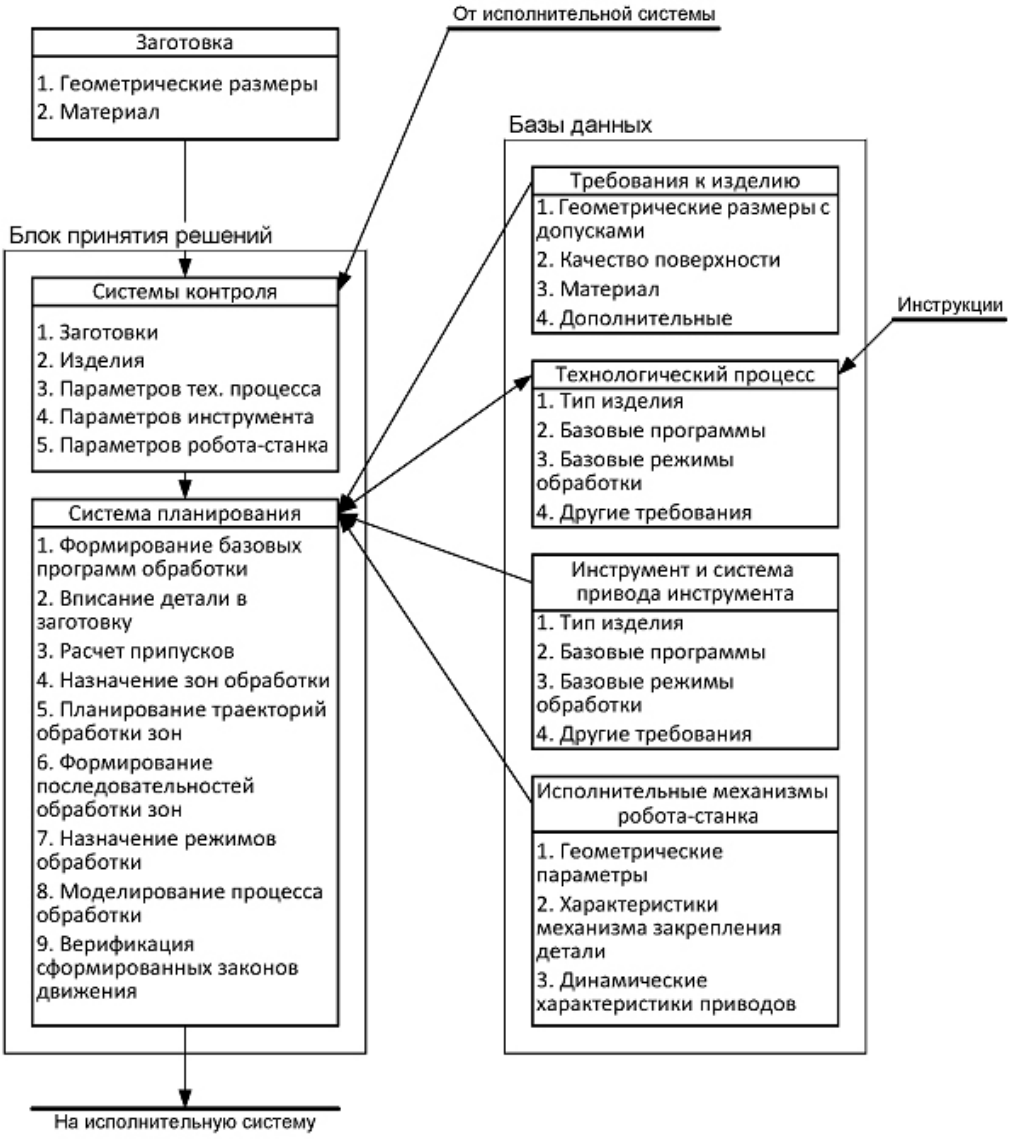


Рисунок 3 – Структурная схема интеллектуальной технологической системы управления робототехническим комплексом

После завершения этапа формирования траекторий СПД решает задачу назначения режимов обработки. На этом этапе производится прогнозирование параметров резания на основе усеченной модели — учитываются лишь упругая модель изделия и модель технологического процесса. На выходе получаем функцию изменения подачи для каждой траектории движения.

Вся априорная информация, необходимая для работы интеллектуальной технологической системы, хранится в базе данных. В ней содержится, в частности, информация о кинематических и динамических характеристиках робота-станка, обрабатываемых лопатках, технологическом процессе, режущем инструменте и шпиндельном узле как основных элементах, определяющих качество воспроизводимой поверхности и режимах обработки.

Финальным этапом работы СПД является проверка сформированных законов движения на комплексной модели процесса обработки (рис.5). В результате моделирования получаем ошибку отработки формообразующих траекторий, далее, в случае если ошибка превышает допуск на обработку, формируются правила корректирования законов движения. В том случае, если ошибка не превышает допуск, сформированные СПД законы движения считаются подтвержденными и транслируются в систему ЧПУ робота–станка.

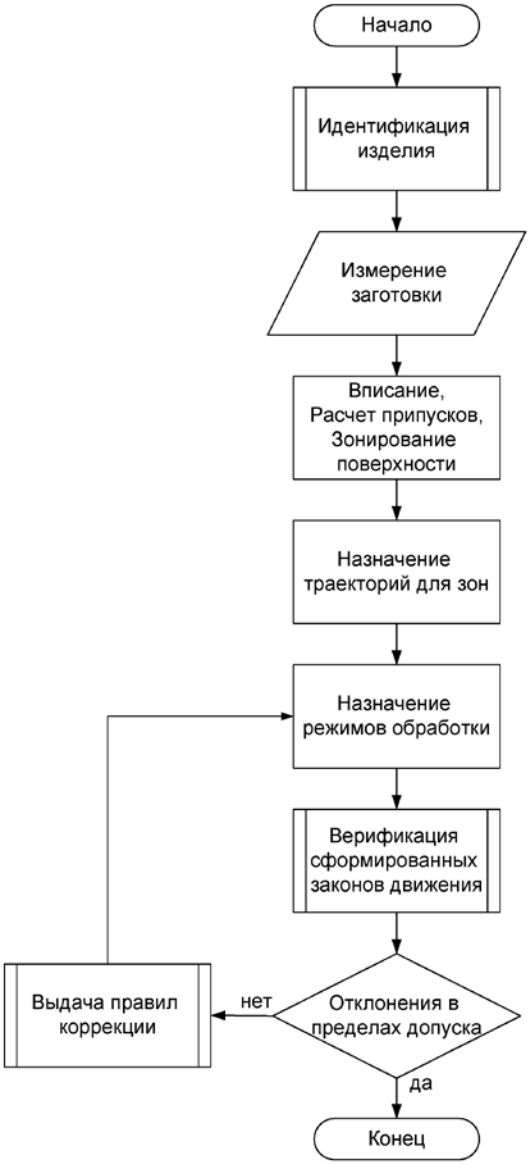


Рисунок 4 – Алгоритм планирования формообразующих движений

Математическая модель

Математическая модель, входящая в состав интеллектуальной технологической системы, включает в себя (рисунок 5):

– динамические модели робототехнических манипуляторов перемещения обрабатываемой детали и обрабатывающего инструмента;

– динамическую модель исполнительного органа обрабатывающего инструмента;

– геометрическую и упругую модели обрабатываемого изделия – пера лопатки ГТД;

– модель технологического процесса обработки;

– модели электрических приводов робота-станка.

Модель изделия

Для различных процессов механической обработки и различного инструмента необходимо получать зависимости (в том числе экспериментальные) между характеристиками взаимного перемещения инструмента и детали (координатами траектории перемещения, скоростями, ускорениями и другими характеристиками) и усилиями взаимодействия, возникающими между деталью и инструментом.

Так при обработке лопаток ГТД определяющей упругой податливостью, в сравнении с механизмом станка, обладает непосредственно перо лопатки. Поэтому при обработке пера лопаток турбин для обеспечения требуемой точности получаемых размеров пера необходимо учитывать упругие свойства пера под действием сил резания.

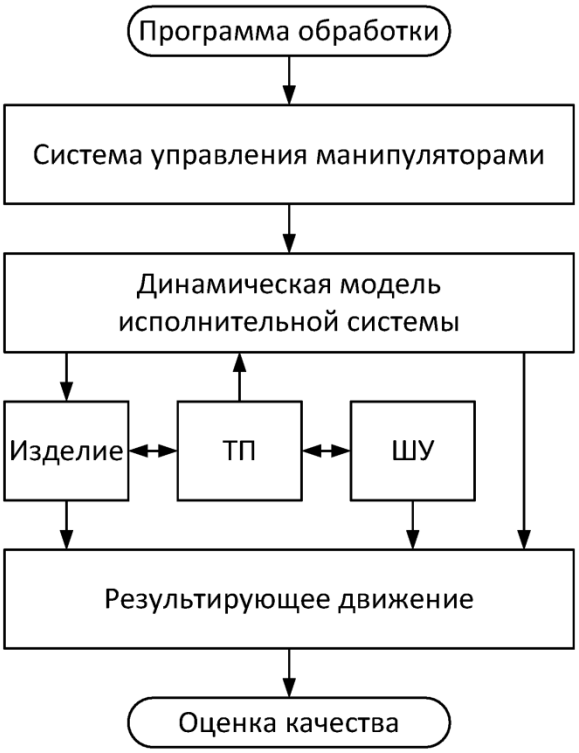


Рисунок 5 – Структурная схема математической модели процесса обработки

На выходе системы высшего уровня *Блок вывода информации* выдает программу для системы управления роботом-станком в реальном времени. Контур обратной связи с системой низшего уровня позволяет реализовать адаптивное управление и обучение интеллектуальной системы.

На этапе проектирования интеллектуальной системы и наполнения ее знаниями о процессе и обрабатываемых деталях эксперты и инженеры наполняют базу знаний и базу целей, а программисты разрабатывают программы алгоритмических методов решений. База данных создается и пополняется, как правило, в процессе эксплуатации интеллектуальной системы.

Работа интеллектуальной системы осуществляется в следующей последовательности. При поступлении информации на вход *Блока ввода информации* на внешнем языке системы производится её интерпретация во внутреннее представление для работы с символьной моделью системы.

Блок логического вывода и формирования управляющей информации выбирает из *Базы знаний* множество правил, активизированных поступившей входной информацией, и помещает эти правила в *Базу целей*, как текущие цели системы.

Далее *Блок логического вывода* и формирования управляющей информации по заданной стратегии, например, стратегии максимальной достоверности, выбирает правило из *Базы целей* и пытается доопределить переменные модели внешнего мира и исполнительной системы и соотнести их с объектом управления. На основе этого активизируются новые правила в *Базе целей*, и начинается логический вывод в системе правил. Эта процедура заканчивается, как только решение будет найдено, либо когда будет исчерпана *База целей*. Найденное решение из внутреннего представления интерпретируется *Блоком вывода информации* во внешний язык подсистемы управления низшего уровня и объекта управления.

Система управления низшего уровня (рис. 6) включает в себя объект управления, которым являются исполнительные манипуляционные механизмы. В состав исполнительных механизмов входят исполнительные двигатели, которые осуществляют их перемещение $\mathbf{R}_Д$ и $\mathbf{R}_И$ по заданным законам в реальном времени $\mathbf{U_И(t)}$ и $\mathbf{U_Д(t)}$ с требуемыми точностью, скоростью и усилием.

Информация о положении выходных звеньев, их скоростях, ускорениях и силах, действующих на них, определяется датчиками, расположенными в шарнирах звеньев.

Общим информационным управляющим каналом системы управления низшего уровня является канал передачи управляющих сигналов **U(t)** и сигналов обратной связи от системы низшего уровня **R(t)**. Управляющее воздействие **U(t)** представляет собой выбранную программу, отработанную и проверенную в системе высшего уровня.

Система низшего уровня осуществляет управление приводами и представляет следящую систему, основное требование к которой выполнить заданную программу.

Обратная связь **R(t)** несет полную информацию о работе системы управления низшего уровня в виде сигналов о ее состоянии, например, об усилиях в процессе обработки, износе инструмента и др. Данная информация используется для пополнения базы данных в системе высшего уровня.

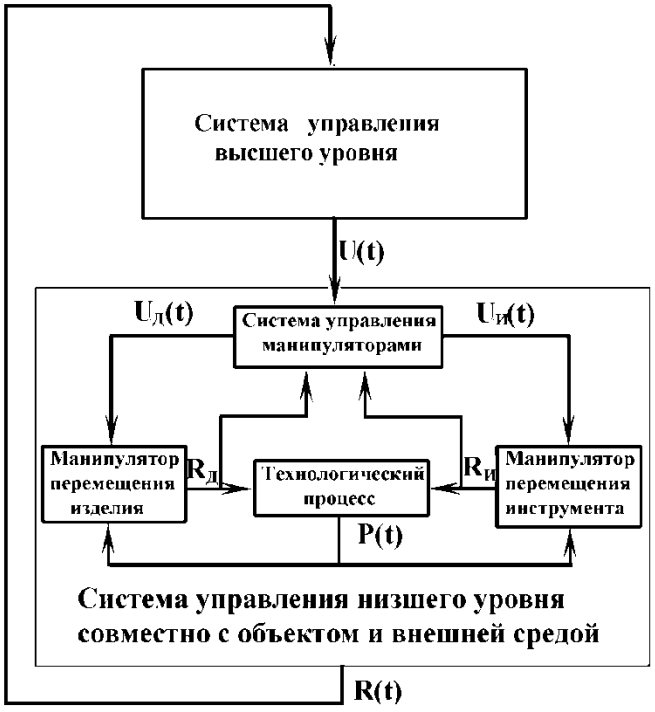


Рисунок 6– Система управления низшего уровня

Искусственный интеллект технологической системы, рассмотренной выше, заключается в возможности распознавать поверхности детали с точки зрения качества и соответствия заданным геометрическим размерам по чертежу, управлять технологическим процессом и принимать решения по его изменению. В свою очередь принятое решение включает программу обработки поверхности, проверенную непосредственно для поступившей заготовки и скорректированную таким образом, чтобы из данной заготовки получить окончательно готовую деталь.

Техническое задание на интеллектуальную технологическую систему включает требования на:

1. систему контроля и обработки информации о технологическом процессе;
2. систему контроля и обработки информации о геометрических размерах обрабатываемой поверхности;
3. систему контроля качества поверхности (шероховатости);
4. систему хранения и преобразования информации в базе данных и базе знаний.

Оптическая система предназначена для периодического контроля геометрических размеров заготовки и отдельных участков поверхности пера лопатки после обработки. В состав системы контроля может быть включена также система контроля качества поверхности (шероховатости).

Требование на систему контроля геометрических параметров контролируемой поверхности пера лопатки и ее качества (шероховатости):

– система должна обеспечивать простую установку в составе комплекса с целью удобства обслуживания и возможностью контроля всей проточной части лопатки;

– система контроля должна обеспечивать получение результатов измерения в системе координат детали и исключать погрешности системы перемещения измеряемого изделия для замера всех участков поверхности пера лопатки;

– система должна обеспечивать возможность замеров независимо от пространственного положения лопатки (ее закрепление в захватном устройстве робота);

– система должна сохранять результаты замеров с целью их отображения и сравнения с допустимыми величинами;

– система контроля должна определять абсолютные размеры анализируемой поверхности в системе координат детали;

– измерение геометрических параметров производится дискретно;

– точность измерения сложной пространственной поверхности должна составлять не более 0.01 мм;

– в системе измерения должны быть предусмотрены технические средства защиты от пыли (должна быть обеспечена работа в цеховых условиях);

– система должна обеспечивать контроль кромки лопатки с радиусом 0.1÷03 мм;

– система должна обеспечивать замер шероховатости на любом требуемом участке (прямолинейном, выпуклом, вогнутом) поверхности пера лопатки;

– система должна обеспечивать возможность измерять шероховатость поверхности с параметром R_a =(0,6÷0,2) мкм;

– программное обеспечение должно обеспечивать сопряжение с системой управления комплексом, информация с системы контроля должна быть предоставлена в виде, удобном для выбора управляющих программ.

Требование на систему хранения и преобразования информации в базе данных и базе знаний:

– система должна обеспечивать хранение в базе данных и преобразование цифровых трехмерных моделей лопатки;

– система должна хранить рекомендации о траекториях движения режущего инструмента и режимах обработки отдельных участков поверхности лопатки.

Заключение

Рассмотренная структура интеллектуальной экспертной системы, основанной на правилах, предназначена для выполнения технологической операции обработки пера лопаток ГТД. Робототехнический комплекс для выполнения данной операции включает промышленный робот, либо робот-станок, оптическую дистанционную систему контроля качества и геометрических параметров обрабатываемой поверхности. Интеллектуальная система управления комплексом, используя базу знаний и базу данных, информацию с оптической системы контроля, а также разработанное программное обеспечение, позволяет для каждой детали, поступающей на финишную операцию, сформировать индивидуальную программу обработки.

A.D. Kulichenko[1,2], E.U. Smirnova[1]

POSSIBLE APPLICATION OF HETEROGENEOUS ROBOT GROUP TO SEARCH AND LOCALIZATION OF IONIZING RADIATION SOURCES

[1]*Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics, Saint-Petersburg*
a.kulichenko@rtc.ru, eus@rtc.ru
[2]*Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU), Saint-Petersburg, Russia,*
art.kulichenko@gmail.com

Abstract

Let us define heterogeneous robot group as the main subject of research. The aim of this work is to investigate the possibilities when heterogeneous robot group can be used to search ionizing radiation sources. To compare the duration of operations, fulfilled by single robot and by robot group, experimental studies have been made. On the basis of the results, gained from the experiments, the strategy and procedures for ionizing radiation sources detection with given accuracy, are determined. Justification for efficiency increase is also given.

Key words: Heterogeneous robot group, group robotics, complexes for radiation reconnaissance, UAV (unmanned aerial vehicle), group robots application possibilities.

А.Д. Куличенко [1,2] , Е.Ю. Смирнова [1]

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ ГЕТЕРОГЕННОЙ ГРУППЫ РОБОТОВ ДЛЯ ПОИСКА И ЛОКАЛИЗАЦИИ ИСТОЧНИКОВ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

[1] *ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург,a.kulichenko@rtc.ru, eus@rtc.ru*
[2] *Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург,*
art.kulichenko@gmail.com

Аннотация

Объектом исследования являются гетерогенная группа роботов. Цель работы – исследование возможностей применения комбинированной группы роботов для поиска источников ионизирующего излучения. В процессе работы проводились экспериментальные исследования продолжительности выполнения операции одним роботом и группой. В результате исследования определена методология поиска ИИИ с заданной точностью, приведено обоснование повышения эффективности.

Ключевые слова: Гетерогенная группа роботов, групповая робототехника, комплексы радиационной разведки, БЛА, возможности применения группы роботов.

Использование роботов наиболее целесообразно в экстремальных условиях, где труд человека и его жизнедеятельность затруднены, невозможны или сопряжены с угрозой для жизни и здоровья [1]. К таким условиям относится работа в полях ионизирующих излучений, например, при ликвидации последствий техногенных катастроф Преимущества группового применения роботов в задачах экстремальной робототехники очевидны [2]. 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; и, наконец, более высокая вероятность выполнения задания, достигаемая за счет возможности перераспределения целей между роботами группы.

Рассмотрим задачу формирования группы роботов для поиска источника ионизирующих излучений (ИИИ) и планирования её работы. Поиск и локализация отдельных ИИИ является специфической задачей. Она возникает при авариях или чрезвычайных происшествиях на производствах, применяющих ИИИ в ограниченном количестве (химическая, пищевая промышленность и т.п.), в хранилищах отработанного ядерного топлива или в местах хранения промышленных ИИИ, при попытках терактов с применением «грязных бомб» и других локальных происшествиях. Такая ситуация с одной стороны, характеризуется относительно небольшой и известной зоной происшествия, с другой стороны, в зоне такой аварии может отсутствовать

специальная служба ликвидации последствий аварии и потребуется доставка специальной техники из местных центров экстренной помощи. Таким образом, роботизированная группа должна быть мобильной, её перемещение к месту проведения работ должно осуществляться с помощью экономичных и относительно недорогих транспортных средств, являющихся одновременно базой для развёртывания поста управления.

Определим оптимальный состав группы и структуру отдельных робототехнических комплексов (РТК), необходимых для выполнения поставленной функциональной задачи. При определении технического облика группы для решения задач поиска и локализации источников ионизирующего излучения (ИИИ) будем учитывать следующие основные соображения:

– наилучшую возможность организации ретрансляции между членами группы при неустойчивой связи и значительное увеличение дальности связи с наземными роботами обеспечивает использование беспилотных летательных аппаратов (БЛА);

– для дистанционного определения направления на ИИИ при возможно большем удалении от источника роботы группы должны быть оснащены устройствами дистанционного зондирования поля излучения;

– для решения пеленгационных и навигационных задач роботы должны быть оснащены устройствами координатной привязки (например, ГЛОНАСС/GPS), при этом должны быть предусмотрены сценарии выполнения работ в зонах пропадания связи наземных роботов со спутниками.

Следующей задачей является планирование групповой работы.

Для задач экстремальной робототехники, где особенно важен временной фактор, а рабочая зона зачастую представляет собой трудно проходимую местность, планирование групповой работы должно обеспечить:

– уменьшение времени выполнения операции в целом;

– экономию энергоресурсов за счет оптимального планирования работ;

– возможность предварительной оценки уровней опасности (например, радиационной опасности) и уточнения карт проходимости рабочей зоны при помощи БЛА.

Дополнительным преимуществом организации групповой работы роботов должна стать минимизация дозной нагрузки на РТК при работе в полях излучения.

Реализация указанных преимуществ возможна за счет проработки логики функционирования и типового сценария работы группы.

Кроме вышеперечисленных, при реальном проектировании должны быть решены следующие задачи:

– организация коммуникации и взаимодействия в группе;

– обеспечение групповой навигации с использованием всей имеющейся навигационной информации;

– создание поста централизованного управления группой с соответствующим аппаратно-программным обеспечением.

Однако, эти задачи не являются специфическими для рассматриваемой предметной области поиска и локализации ИИИ и могут быть решены на базе известных теоретических подходов [3].

В настоящей статье проанализированы существующие методов решения задачи поиска и локализации ИИИ и обоснована возможность их усовершенствования за счет применения гетерогенной группы роботов;

В целом, методы и устройства поиска и локализация ИИИ основаны на анализе параметров поля излучения, которые могут быть измерены дистанционно, на удалении от ИИИ. Для поиска ИИИ широко используются гамма-пеленгаторы, измеряющие курсовой угол на источник с точностью порядка 1-3 градуса [4].

При работе наземного робота последовательно выполняются:

– обнаружение ИИИ;

– определение местоположения ИИИ в системе координат, связанной с роботом;

– подход робота к ИИИ на расстояние, достаточное для работы манипулятора.

Приведем общее описание алгоритма поиска и локализации ИИИ наземным роботом.

Перед началом поиска выполняется измерение интенсивности фонового излучения. Далее начинается поиск, в процессе которого выполняется перемещение МР по исследуемой территории с периодическими остановками (стоянками). В процессе поиска считаем, что местоположение ИИИ относительно РТК характеризуется двумя параметрами: курсовым углом а и дистанцией *d* (рисунок 1).

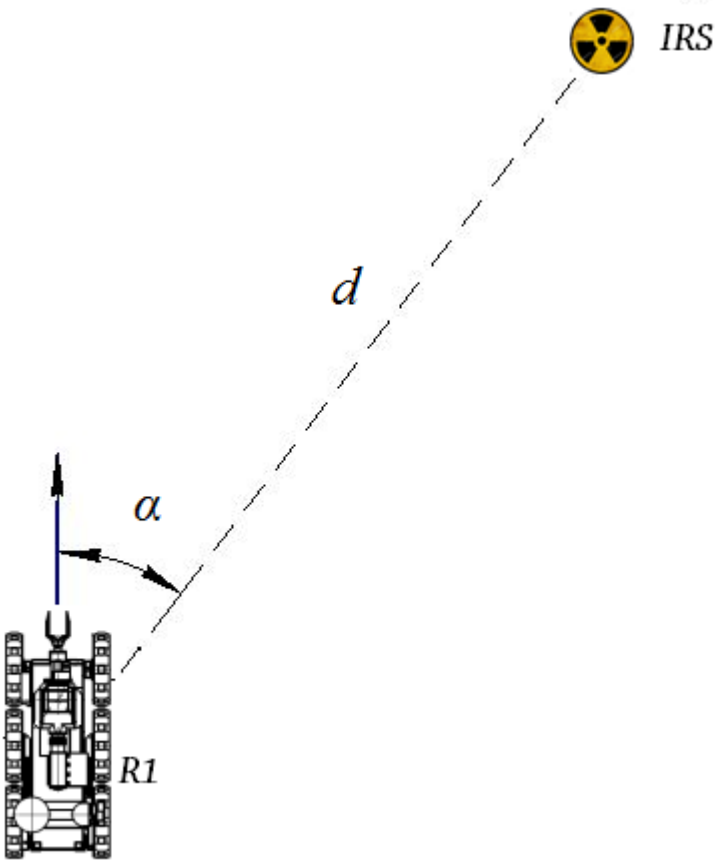


Рисунок 1 – Пеленгация ИИИ роботом

Основные измерения и статистический анализ их результатов, позволяющий определить положение источников на местности, выполняются на стоянках РТК. При этом на стоянках производятся следующие действия:

– в течение времени экспозиции выполняется регистрация излучения гамма-пеленгатором, оценивается направление на ИИИ, рассчитывается погрешность оценки направления.

– если между текущей и предыдущей стоянками было выполнено контролируемое (с измерением пройденного расстояния) перемещение РТК оценивается расстояние от РТК до ИИИ, путём сравнения уровня излучения, зарегистрированного на этих стоянках и рассчитывается погрешность оценки расстояния.

Далее выполняется поворот РТК в направлении ИИИ с учетом измеренного угла и перемещение РТК к ИИИ с учетом измеренного расстояния. В процессе перемещения контролируется градиент уровня излучения и оперативно вычисляется приближенная оценка расстояния до ИИИ.

Наземный РТК способен локализовать ИИИ с точностью, достаточной для его изъятия и помещения в контейнер при помощи манипулятора. Основным недостатком рассмотренного метода является то, что задача локализации ИИИ одним наземным роботом принципиально не может быть решена с необходимой точностью без приближения к источнику, то есть без входа робота в зону всё более высоких уровней радиации. На удалении от источника, в области слабых радиационных полей, велика погрешность оценки расстояния d, поскольку для оценки этого параметра используется величина градиента радиационного поля. Вблизи от источника робот либо подвергается риску разрушения его электронных компонентов, либо требуется значительное удорожание изделия из-за использования экранирующих сплавов или более стойких комплектующих элементов. Повышение

точности оценки расстояния при пеленгации возможно за счет использования метода триангуляции, то есть, в рассматриваемом случае, за счет работы одновременно двух наземных РТК.

При помощи программы статистического моделирования были проведены серии экспериментов по поиску ИИИ одним роботом. Решалась задача определения среднего времени поиска ИИИ и процента удачных выполнений операции одним роботом в условиях минимального радиационного воздействия на робот и оператора. В соответствии с нормами радиационной безопасности, за минимальное воздействие в точке старта была принята мощность экспозиционной дозы (МЭД) 50 мкР/ч, за предельно допустимое воздействие - 250 мкР/ч. Расстояние до источника было выбрано равным 500 метров, что является типичным радиусом рабочей зоны легкого робота. Величина естественного фона выбиралась равной 14 мкР/час (нормальный фон, НФ) и 28 мкР/ч (естественный повышенный фон, ЕПФ).

По результатам моделирования получены зависимости СКО оценки угла в точке старта робота от времени экспозиции. Результаты моделирования представлены в таблице 1, график зависимости СКО угла от времени поиска каждого эксперимента представлены на рисунке 2.

Таблица 2. Результаты моделирования зависимости СКО оценки угла на ИИИ от времени экспозиции в точке старта

МЭД в точке старта, мкР/ч			
50			
НФ		**ПЕФ**	
Вариант начальных условий I		**Вариант начальных условий II**	
Среднее время экспозиции, с	**СКО угла, °**	**Среднее время экспозиции, с**	**СКО угла, °**
5989,74	0	28156,7	0,86
3070,62	2,22	6481,61	2,22
1148,63	4,19	2131,46	4,59
345,79	6,06	608,28	6,82
174,56	7,7	316,36	9,64
134,42	8,8	242,94	9,9
МЭД в точке старта, мкР/ч			
250			
НФ		**ПЕФ**	
Вариант начальных условий III		**Вариант начальных условий IV**	
Среднее время стоянки, с	**СКО угла, °**	**Среднее время стоянки, с**	**СКО угла, °**
1841,94	0,86	2267,49	0,83
416,67	2,2	499,51	2,31
152,34	3,94	186,09	4,02
46,1	5,98	54,06	6,7
27,34	7,01	29,07	7,89
22,03	7,9	24,08	8,5

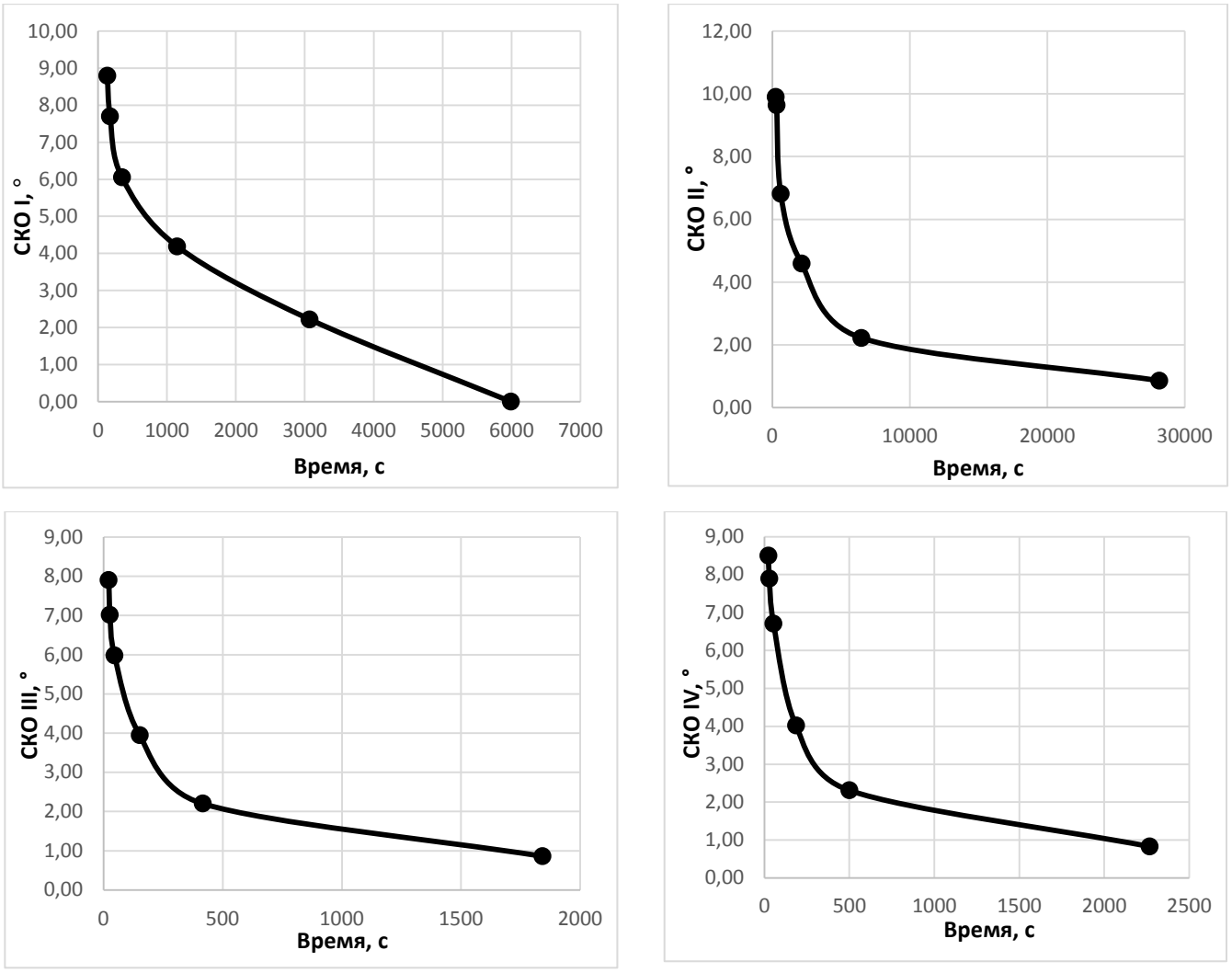


Рисунок 2 – Графики зависимости СКО оценки угла на ИИИ от времени экспозиции в точке старта

Из приведенных данных видно, что при условии старта из безопасной зоны (варианты расчета I и II) погрешности меньше 6º обеспечиваются за счет резкого увеличения длительности первой стоянки.

Далее было проведено моделирование миссий поиска, то есть автоматических передвижений одного робота к источнику для всех вариантов начальных условий I-IV. При этом были введены ограничения на время стоянки равное 50 мин. Удачными считались миссии поиска, в которых роботу удавалось достигнуть места нахождения источника.

По результатам моделирования был определен процент удачных миссий и среднее время выполнения миссии. При определении среднего времени учитывались все миссии, включая неудачные. Полученные результаты моделирования представлены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты моделирования поиска ИИИ одним роботом в автоматическом режиме

Характеристика	**Значение**			
	Вариант			
	I	**II**	**III**	**IV**
Среднее время выполнения миссии поиска ИИИ, с	3611,5	12291,33	4159,5	4074
Процент удачных миссий, %	40	30	90	90

Проведенное моделирование показало, что время выполнения миссии одним роботом занимает в среднем до 3,5 ч, что находится на пределе возможностей работы легкого робота без подзаряда или замены аккумуляторов. Поставленное условие минимума радиационной нагрузки на оператора в точке старта не позволяет обеспечить 100 % выполнение поставленной задачи.

Уменьшить время поиска без увеличения радиационной опасности для оператора возможно путём согласованной пеленгации ИИИ на возможно большем удалении от этих источника силами двух или более роботов.

БЛА, оснащенный средствами радиационного поиска, может вести разведку местности с высоты, не подвергаясь радиационной опасности. Использование БЛА дает возможность выбрать место развёртывания группы наземных роботов в относительно безопасной зоне, примерно определить зону нахождения ИИИ, оценить наличие препятствий в зоне работ, организовать надежную связь и наблюдение за ходом работ [5]. Однако, при проведении воздушной радиационной разведки основным методическим недостатком является значительная погрешность локализации ИИИ, вызванная пространственным осреднением поля.

Таким образом, наилучший результат может быть достигнут при использовании группы следующего минимального состава:

– сверх-легкий наземный РТК, оснащенный гамма-пеленгатором;

– легкий наземный РТК, оснащенный гамма-пеленгатором, манипулятором и контейнером;

– два БЛА вертолётного типа. Один предназначен для предварительной радиационной разведки, второй – для видеонаблюдения с проведением работ наземными РТК и организации связи с ними.

Проанализируем выполнение миссии по поиску ИИИ двумя наземными роботами с участием БЛА. Будем считать, что с помощью БЛА определены:

– граница безопасной зоны;

– приблизительное положение ИИИ, с ошибкой порядка ±75 метров (ошибка обусловлена пространственным осреднением и динамкой перемещения БЛА).

Принимаем следующие разумные допущения:

– исходная расстановка роботов на границе безопасной зоны выполняется при помощи транспортного средства доставки

– бортовой приёмник система GPS/ ГЛОНАСС определяет координаты роботов в абсолютной системе коррдинат с пренебрежимо малой ошибкой

– роботы одинаково ориентированы по азимуту.

Найдём наилучшее для начала миссии взаимное расположение роботов, считая наилучшим то, при котором вероятность успешного выполнения мисси поиска будет равна 100%, а время выполнения миссии будет наименьшим. Иллюстрация задачи представлена на рисунке 3, априорное предварительное положение ИИИ обозначено точкой И, начальное положение роботов - Р1 и Р2.

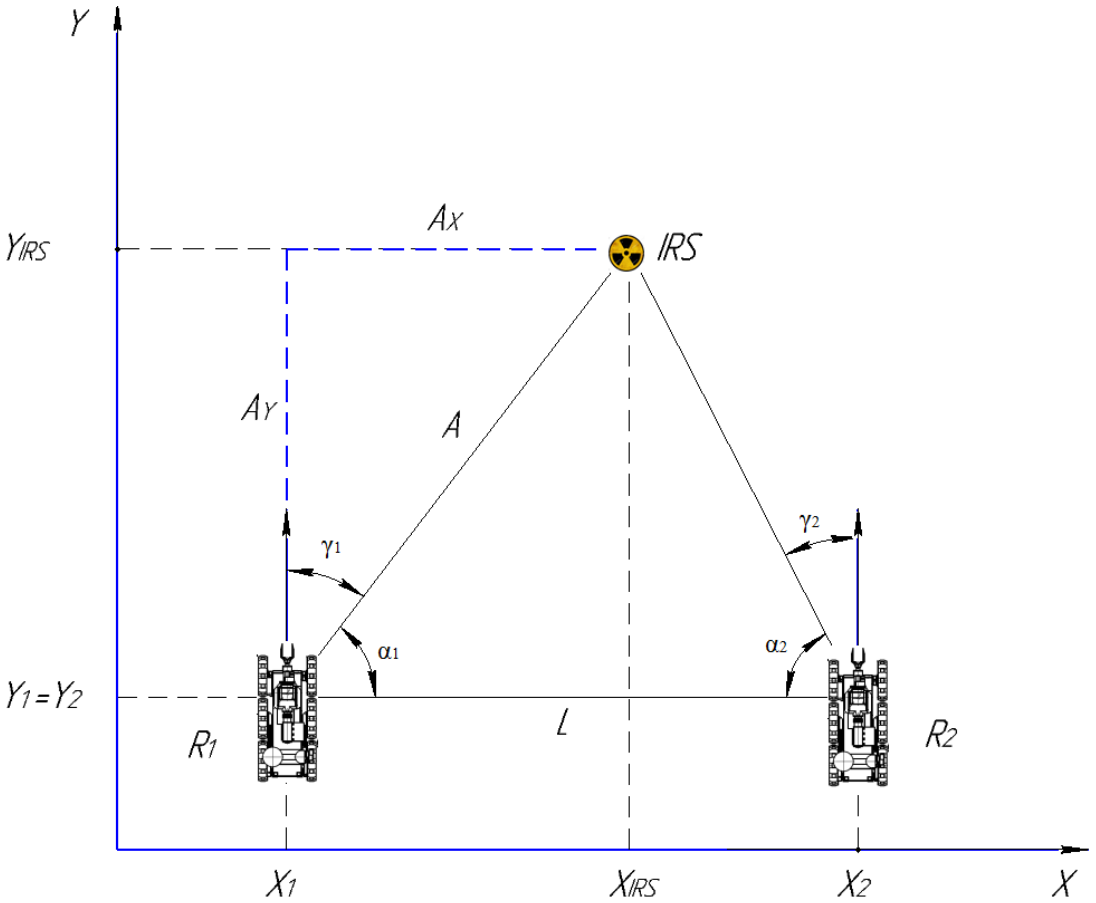


Рисунок 3 – Пример расположения двух роботов в начале миссии поиска ИИИ

Очевидно, координаты такого источника Xи и Уи находятся из системы уравнений:

$$\begin{cases} X_u = X_1 + L\frac{\cos(\gamma_2)}{\sin(\gamma_1+\gamma_2)} \cdot \sin(\gamma_1); \\ Y_u = Y_1 + L\frac{\cos(\gamma_2)}{\sin(\gamma_1+\gamma_2)} \cdot \cos(\gamma_1) \end{cases} \quad (1)$$

Величины Xu и Yu явным образом зависят от некоррелированных случайных величин - оценок углов γ1 и γ2 и сами являются случайными величинами. Для нахождения СКО оценок этих величин вычислим их дисперсии методом линеаризации [6]:

$$\begin{cases} 6^2_{X_u} = \sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\partial X_u}{\partial \gamma_i}\right)^2 \cdot 6^2_{\gamma_i}; \\ 6^2_{Y_u} = \sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\partial Y_u}{\partial \gamma_i}\right)^2 \cdot 6^2_{\gamma_i}; \end{cases} \quad (2)$$

где бγ1 и бγ2 - СКО оценок углов направления на ИИИ γ1 и γ2 соответственно.

Задавая размер ошибок определения координат, мы получаем ограничения на величины бγ1 и бγ2.

На рисунке 4 приведена графическая интерпретация связи бγ1 и бγ2 и ошибки выхода к ИИИ. Ромб (синяя линия) своими сторонами определяет границы нахождения ИИИ, а проекции диагоналей ромба равны 3·бXu и 3·бYu.

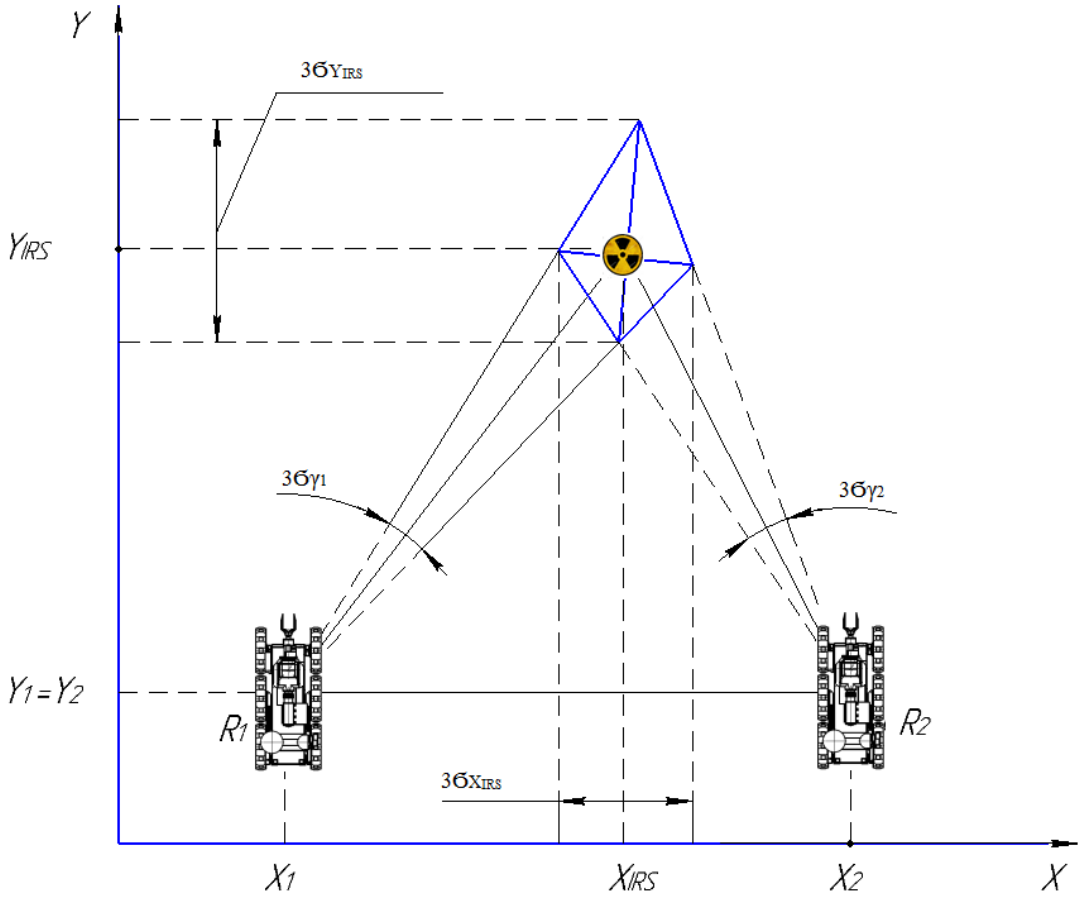


Рисунок 4 – Область нахождения ИИИ

Проведенные расчеты показали, что минимальные значения СКО функций Xu и Yu достигаются, если углы γ1 и γ2 находятся в диапазоне от 32° до 48°. Таким образом, наилучшее начальное расположение роботов считаем определенным.

Далее было выполнено моделирование следующего метода организации миссии поиска:

– определение оценок угловых направлений на ИИИ обоими роботами одновременно с погрешностью 6;

– вычисление уточненных (по сравнению с априорными) координат ИИИ и области его нахождения (см. рисунок 4);

– безостановочное перемещение робота, оснащенного манипулятором, по кратчайшему расстоянию на расчетную границу области нахождения ИИИ;

– определение уточненного направления на ИИИ и уточненных координат ИИИ с расчетной границы;

– выход робота, оснащенного манипулятором, к ИИИ способом, описанным для одного робота.

Результаты моделирования миссий поиска для вариантов I – IV начальных условий представлены в таблице 3.

Таблица 3. Результаты расчета времени поиска ИИИ двумя роботами в автоматическом режиме

Характеристика	**Значение**			
	Вариант			
	I	II	III	IV
Среднее время выполнения миссии поиска ИИИ, с	1645	2300	1111	1165
Процент удачных миссий, %	100	100	100	100

В рамках проведенного исследования были выявлены недостатки существующих решений по поиску и локализации ИИИ. Анализ существующих роботизированных средств радиационной

разведки показал целесообразность применений групповой робототехники. Существующие методы решения задачи поиска и локализации ИИИ не рассчитаны на применение их к группе роботов. Определение методики выполнения операции позволяет определить возможность их усовершенствования за счет применения гетерогенной группы роботов. На основе существующих алгоритмов реализации метода выполнения задачи поиска одиночным роботом был проведен ряд математических моделирований работы гетерогенной группы роботов.

Результаты проведенного исследования показывают, что время выполнения операции поиска ИИИ в случае применения группы роботов сокращается в 2 – 5 раз в зависимости от начальных условий, следовательно уменьшается интегральная поглощенная роботами доза радиации. Процент удачных миссий в случае применения группы роботов достигает максимума в 100%. Предложенная методика рассчитана на выполнение операции в автоматическом режиме, минимизируя участие человека оператора, что ведет к увеличению эффективности [7]. Исходя из результатов данного исследования, обоснован состав подвижной гетерогенной группы, включая: легкого наземного робота (до 300 кг) с манипулятором, сверх-легкого наземного робота (до 50 кг) и два малых БЛА вертолётного типа. Время непрерывной работы членов такой группы составляет 2-3 часа, что гарантирует решение задачи поиска и изъятия предложенным в работе методом. Проведенные исследования показывают снижение значения интегральной поглощенной дозы примерно в 1,4 – 2,0 раза по сравнению с работой одиночного робота. В комплексе с надлежащими работами по дегазации, дезактивации можно рассчитывать на возможность соответствующего увеличения срока службы комплекса и продления сроков до средних, полных, капитальных ремонтов. Габаритно-массовые характеристики указанных наземных роботов и БЛА позволяют расположить их в одном малогабаритном средстве передвижения и доставки, например, в грузопассажирском автомобиле повышенной проходимости [8]. Таким образом, обеспечивается возможность оперативного реагирования на аварийную обстановку.

Проведенные испытания выявили, что при проведении воздушной радиационной разведки основным методическим недостатком является значительная погрешность определения местоположения ИИИ, вызванная пространственным осреднением поля МЭД. Таким образом, требуется проработка алгоритмов обработки информации с блоков детектирования, размещаемых на БЛА.

Результаты проведенной работы будут использованы при разработке методики эксплуатации перспективного комплекса радиационной разведки, разрабатываемого в ЦНИИ РТК. Возможно применение результатов работы для специфичных задач пеленгации иными робототехническими комплексами и системами.

1. Юревич Е.И. Авария на Чернобыльской АЭС и экстремальная робототехника / Е. И. Юревич // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2004. – № 3. – С. 22–24.
2. Бойко А.Ю., Васильев А.В., Денисеня Ю.А., Липовский Д.Д. Определение приоритетных направлений развития технологий робототехнических комплексов военного назначения войск радиационной, химической и биологической защиты Вооруженных Сил Российской Федерации. Робототехника и техническая кибернетика. – 2017. – № 1(14). – С. 21-31.
3. Каляев, И.А. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов / И.А. Каляев, А.Р. Гайдук, С.Г. Капустян. –М.: Физматлит, 2009. –280 с.
4. ГНЦ РФ Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики. URL:https://www.rtc.ru/ru/sredstva-radiatsionnogo-kontrolya/imd-24. (дата обращения: 20.05.2017).
5. Спасский Б.А. Совместное применение беспилотных аппаратов различного базирования. обзор состояния развития./ Робототехника и техническая кибернетика. – 2016. – № 2(11). – С. 8 19.
6. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей и её инженерные приложения / М.: КНОРУС, 2016. -480 с.
7. Спасский Б.А. Совместное управление роботами, автономное и от человека-оператора./ Робототехника и техническая кибернетика. – 2016. – № 2(11). – С. 69 76.
8. Andreev V., Kirsanov K., Pryanichnikov V. (2016),Geographically distributed “multi-operator” Control for Mechatronic Devices via the Internet, In Proceedings of the 26th DAAAM International Symposium., B. Katalinic (Ed.), Published by DAAAM International, ISBN: 978-1-5108-1839-2, ISSN 1726-9679, Vienna, Austria. 2015. Curran Proceedings, New York,.pp. 0004-0011.

V.I. Syryamkin[1], V.I. Gutsul[2], I.S. Firsov[3], M.V. Syryamkin[1]

DEVELOPMENT OF THE CATERPILLAR ROBOT FOR ENVIRONMENTAL MONITORING

[1]National research Tomsk State University, Tomsk
[2]Seversk branch FSUE «Emergency Technical Center of Minatom of Russia», St. Petersburg, seversk@nwatom.ru
[3]National research Tomsk State University, Tomsk, ivan09031@gmail.com

Abstact

Presented results of the work of the robot on a caterpillar course development. This development relates to remotely controlled systems designed for monitoring the environment and exploration during in the localization or elimination of emergencies, in particular for radiation and chemical pollution, as well as for a complex of restoration or dismantling operations in an accident zone. In the development is used block-modular principle with a universal control station.

Keywords: robot, robotic platform, monitoring, environment.

В.И. Сырямкин[1], В.И. Гуцул[2], И.С. Фирсов[3], М.В. Сырямкин[1]

РАЗРАБОТКА РОБОТА НА ГУСЕНИЧНОМ ХОДУ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

[1]Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск
[2]Северский филиал ФГУП «Аварийно-технический центр Минатома России», Санкт-Петербург, seversk@nwatom.ru
[3]Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, ivan09031@gmail.com

Аннотация

Представлены результаты работы по разработке робота на гусеничном ходу. Данная разработка относится к дистанционно управляемым системам, предназначенным для осуществления мониторинга окружающей среды и разведки местности в ходе локализации или ликвидации чрезвычайных ситуаций, в частности при радиационных и химических загрязнениях, а также при проведении комплекса восстановительных или демонтажных работ в зоне аварии. В разработке применяется блочно-модульный принцип с универсальным постом управления.

Ключевые слова: робот, робототехническая платформа, мониторинг, окружающая среда.

Введение

Робототехника – одно из перспективных направлений вычислительной техники. Роботы нашли применение во многих областях промышленности, научно-исследовательской деятельности, и других сферах деятельности человека.

В настоящее время в мире разработано и широко используется большое семейство различных роботов, заменивших людей на опасных для здоровья и тяжелых физических работах [1].

Одной из основных задач применения робототехнических комплексов (РТК) является исследование окружающей среды при чрезвычайных ситуациях (ЧС), в частности при радиационных и химических загрязнениях [2].

Выполнение этих задач связано с опасностью получения химического отравления или радиационного облучения персоналом, который привлекается при ликвидации ЧС [3]. Одним из видов робототехнических комплексов для решения данной проблемы являются комплексы на базе гусеничных платформ [4–6].

Основные виды работ и объемы применения РТК

1. Применение РТК при ликвидации техногенных аварий.

Анализ аварий, происходящих в мире, показывает, что причин аварий большое количество. Однако основные виды работ, проводимых при каждом случае, повторяются и состоят из:

– разведки в зоне аварии;

– проведения работ по ликвидации аварии;

– проведения комплекса восстановительных или демонтажных работ в зоне аварии (при необходимости).

2. Применение РТК во вредных и опасных для здоровья человека условиях

3. Применение РТК при стихийных бедствиях, наводнениях, пожарах и т.д.

4. Применение РТК для поиска и спасения людей.

5. Применение РТК для помощи силовым подразделениям:

– проведение наземной и воздушной разведки;

– составление карт минных полей;

– разминирование и исследование опасных предметов;

– эвакуация раненых;

– доставка необходимого оборудования и боеприпасов.

6. Применение РТК для обследования состояния газо- и нефтепроводов, крыш зданий, высотных сооружений.

Параллельно с созданием РТК приоритетный характер должны носить работы по созданию унифицированных модульных элементов, узлов, агрегатов РТК и ДУС, таких как:

– модули передачи данных и энергоносителей;

– телевизионные системы;

– осветительные системы;

– системы гиростабилизированных платформ;

– звуковые датчики;

– датчики мощности фона радиационного излучения;

– гамма-локаторы;

– тепловизоры;

– газоанализаторы;

– навесные элементы.

– а также разработки методик работы с ними

Робототехнические комплекты наземного типа

РТК наземного типа предназначены для проведения различного вида работ в условиях, опасных для пребывания человека. Основными преимуществами данного типа являются высокая грузоподъемность и длительный режим работы от аккумулятора без подзарядки. Допускают работу по длинному кабелю от внешнего источника питания.

Обладают возможностью комплектоваться большим набором разнообразных датчиков и манипуляторов. Может использоваться как внутри помещений, так и на открытой местности.

Обучение работе с данным РТК занимает самое минимальное время и не требует специальных тренажеров. Ошибки оператора, как правило, не приводят к фатальным последствиям.

К основным недостаткам относится низкая способность к преодолению различных препятствий несмотря на огромные усилия разработчиков и большие денежные затраты на различные технические разработки.

Робототехнический комплекс для инженерной и радиационной разведки ПС-04р

ПС-04р состоит из подвижного аппарата на 2-х гусеничном шасси повышенной проходимости и мобильного поста управления. На корпусе установлено подъемное устройство с платформой в верхней части, предназначенное для размещения обзорной видеокамеры и других устройств, 2 видеокамеры управления, цифровая поворотная видеокамера малой дальности с оптическим зумом, аналоговая поворотная камера повышенной четкости, цифровая HD записывающая камера, стационарное оборудование радиационной разведки с датчиком GPS, навесное оборудование для радиационной разведки, аппаратура радиоуправления и передачи цифровой информации.

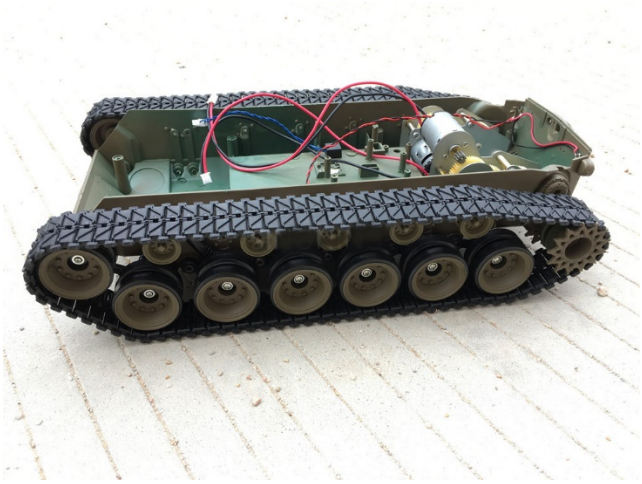


Рисунок 1 – Гусеничная платформа

ПС-04р штатно комплектуется навесным оборудованием:

– системой гамма-съёмки загрязнённых территории «ДКГ-01 СТАЛКЕР»:

– измерителем мощности поглощенной дозы гамма-излучения с измерением поглощенной дозы;

– четырьмя телевизионными камерами (2 поворотные);

– подъемным устройством для обзорных видеокамер на высоту 1.42м.;

– передней и задней осветительной фарами;

– микрофоном на подвижном аппарате для передачи на пост управления звуковой информации. Работает с использованием радиосвязи (800 м в прямой видимости).

Управление ПС-04р осуществляется с поста управления специально оборудованного автомобиля или с переносного поста. Оба поста имеют в своем составе телевизионный монитор и видео-очки для дистанционного управления, компьютер для вывода карты радиационной обстановки.

Рисунок 2 –Универсальный пост управления

РТК обладает следующими основными техническими данными: масса – 75 кг, длина – 1002 мм, ширина – 500 мм, высота – 480 мм, максимальная скорость перемещения – 9 км/ч. Имеется возможность преодолевать различные виды препятствий (проемы 550*600 мм, лестничные переходы с уклоном до 40°, барьеры высотой до 200 мм, траншеи шириной до 600 мм), выполнять разворот на месте, перемещаться по различным видам поверхностей, в том числе по снежному покрову глубиной до 150 мм. Питание аппаратуры и ходовых двигателей осуществляется от аккумуляторной батареи с возможностью подзарядки от зарядного устройства, время непрерывной работы – 3 часа.

Для осуществления мониторинга радиационной и химической загрязненности окружающей среды предлагается использовать прибор собственной разработки.

Для создания прибора предлагается использовать микроконтроллер, который бы опрашивал прибор (индикатор) и GPS для получения информации о местоположении робототехнической платформы, объединял полученные данные и передавал их по радиоканалу на пульт управления.

Для создания индикатора радиационного загрязнения был выбран микроконтроллер Arduino UNO (рис. 3), который имеет следующие характеристики: микроконтроллер ATmega328, рабочее напряжение 5В, напряжение питания 6-20В, 14 цифровых входов/выходов, 6 аналоговых входов (АЦП), тактовая частота 16 МГц [7].

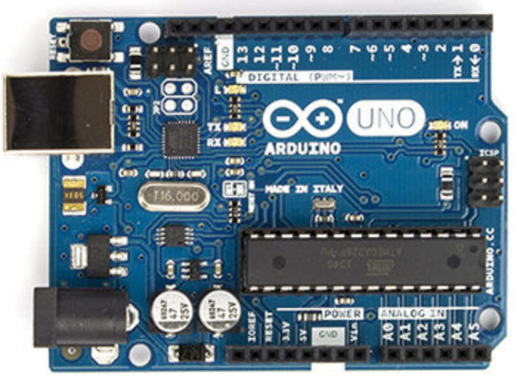


Рисунок 3 –Внешний вид микроконтроллера Arduino UNO

К данному микроконтроллеру подключается GPS датчик (рис. 4) для определения место нахождения робототехнического комплекса, в качестве прибора для определения уровня радиационного загрязнения используем детектор излучения DIY Kit с датчиком СБМ-20 (рис. 5).

Особенностью этого датчик является наличие встроенной в него GPS антенны, т.е. его достаточно просто подключить к микроконтроллеру и загрузить соответствующую программу. Датчик GPS имеет следующие характеристики: точность позиционирования – 2,5 mCEP (SBAS: 2.0 mCEP), частота обновления – максимум 10 Гц (по умолчанию 1 ГЦ), протокол: NMEA [8].

Детектор излучения имеет следующие технические характеристики:

– Трубка Гейгера PCB совместима с J305, M4011, STS-5, SBM-20;
– Анодное напряжение 350-480В;
– Звуковая и визуальная индикация;
– Напряжение питания: 5В;
– Ток: 12мА;
– Размеры: 120 x 50 мм;
– Вес: 150гр.

Рисунок 4 –Датчик GPS со встроенной антенной NEO-7m

Рисунок 5 –Детектор излучения DIY Kit

Схема подключения датчика GPS и детектор излучения DIY Kit к плате микроконтроллера Arduino UNO приведена на рис. 6.

Связь микроконтроллера с компьютером, установленным в пульте управления, осуществляется с помощью радиомодема по протоколу RS-232.

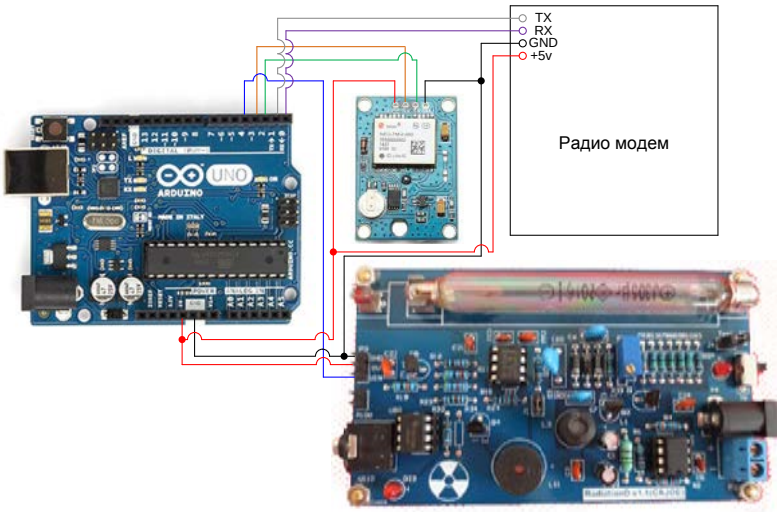


Рисунок 6 – Схема электрических соединений прибора

РТК также обладает возможность эксплуатирования при температурах от -35 до +35^{o}C, при максимальном значении относительной влажности воздуха при +25 ^{o}C составляет 98%.

Вывод

В ходе выполнения работы был разработан робототехнический комплекс ПС-04р на гусеничном ходу для осуществления исследования окружающей среды с применением собственного прибора для мониторинга радиационной и химической загрязненности. Ввиду малой стоимости, простоте обслуживания, ПС-04р может использоваться для обучения сотрудников методам работы с робототехническими системами. Работа выполнена по программе повышения конкурентоспособности Национального исследовательского Томского государственного университета при поддержки гранта РФФИ №16-29-04388.

1. В.И. Сырямкин. Интеллектуальные робототехнические и мехатронные системы: учеб. пособие – Томск, 2017. – 256 с.

2. Л.А.Торгашов, В.И. Гуцул, С.В. Романенко. Разработка и создание робототехнической платформы повышенной проходимости, как элемент обеспечения ликвидации чрезвычайных ситуаций // Вестник науки Сибири. 2013. № 4 (10). – с. 104-108
3. Радиационная безопасность. Рекомендации МКРЗ 1990 г. Публ. 60, ч. 2 МКРЗ: пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 207 с.
4. Шахинпур М. Курс робототехники: пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 526 с.
5. Фу К., Гансалес Ф., Лик К. Робототехника: пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 624 с.
6. Кочтюк В.И., Гавриш А.П., Карлов А.Г. Промышленные роботы: конструирование, управление, эксплуатация. – Киев: Вища школа, 1985. – 359 с.
7. Arduino UNO [Электронный ресурс]. URL: https://goo.gl/nzMvNk.
8. NEO-7 series [Электронный ресурс]. URL: https://goo.gl/AWqyQX.

D.A. Gromoshinskii, A.M. Zhukov, A.V. Popov, E.Yu. Smirnova

PROVIDING SAFE GROUND SAMPLING INSIDE THE WORKING ZONE OF A MANIPULATOR WITH COMPUTER VISION

Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics, Saint-Petersburg
d.gromoshinskiy@rtc.ru, a.zhukov@rtc.ru, apopov@rtc.ru

Abstract

One of the tasks of extreme robotics is the interaction of the robot with the underlying surface. To ensure of the safety of this interaction when sampling ground with the manipulator, it is possible to use a number of sensors to determine the presence of objects in the working area of the manipulator and to estimate the distance to them. As such sensors can act: a television camera, a laser rangefinder, as well as an ultrasonic sensor. In this work, as a sensor, a television camera is installed on the final stage of the manipulator.

To determine the three-dimensional coordinates of the sampling point and the normal to the underlying surface at a given point, two or more photographs of the underlying surface are made with the camera in different positions of the manipulator. Based on the received images, a stereo reconstruction of the underlying surface is performed using the developed software and algorithmic support. Obtained in this way, the three-dimensional coordinates of the sampling point and the normal vector are used to solve the inverse kinematics problem, the result of which are the generalized coordinates of the manipulator joints at the ground sampling point. The construction of a three-dimensional model of the underlying surface with the overlay of video frames on it additionally makes this sampling easier in case of the control from a human operator.

For stereo reconstruction algorithms of the underlying surface, an extremely important aspect is the accurate determination of the mutual position of the cameras (frames capture points). In the classical problem of stereo reconstruction two cameras are used, spaced apart from each other to distance, called a stereo base. To determine their mutual position, special templates and calibration algorithms are used. Stereo calibration is performed once, provided that the mutual position of the cameras is unchanged.

When using one television camera installed on the manipulator, the calculation of the mutual position of the camera in different positions of the manipulator is made proceeding from the solution of the direct problem of the kinematics of the manipulator. Due to the presence of backlashes in the manipulator joints, as well as the inaccurate determination of the transition matrix from the coordinate system (CS) of the end stage of the manipulator to the camera optical center CS, to occur errors of the determination of the mutual position of the camera. To refine the transition matrix between camera positions, an algorithm for calculating the refining transition matrix using a special calibration template is proposed. Full-scale experiments showed that using of the refined transition matrix provides a higher reconstruction density of the three-dimensional underlying surface, and also leads to an increase in the accuracy of determining the ground sampling point.

Key words: stereo vision, ground sampling inside the working zone of a manipulator.

Д.А. Громошинский, А.М. Жуков, А.В. Попов, Е.Ю. Смирнова

ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОГО ЗАБОРА ПРОБЫ ГРУНТА В РАБОЧЕЙ ЗОНЕ МАНИПУЛЯТОРА С ПОМОЩЬЮ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург
d.gromoshinskiy@rtc.ru, a.zhukov@rtc.ru, apopov@rtc.ru

Аннотация

Одной из задач экстремальной робототехники является взаимодействие робота с подстилающей поверхностью. Для обеспечения безопасности такого взаимодействия при заборе пробы грунта с помощью манипулятора робототехнического комплекса, возможно использование ряда сенсоров для определения наличия объектов в рабочей зоне манипулятора и оценки расстояния до них. В качестве таких сенсоров могут выступать: телевизионная камера, лазерный дальномер, а также ультразвуковой датчик. В данной работе в качестве сенсора выбрана телевизионная камера, установленная на конечном звене манипулятора.

Для определения трехмерных координат точки забора пробы и нормали к подстилающей поверхности в данной точке, с помощью камеры производится два или несколько снимков подстилающей поверхности в различных положениях манипулятора. По полученным снимкам с помощью разработанного программно-алгоритмического обеспечения производится стерео реконструкция подстилающей поверхности. Полученные таким образом трехмерные координаты точки забора и вектор нормали используются для решения обратной задачи кинематики, результатом которой являются обобщенные координаты шарниров манипулятора в точке забора грунта. Построение трехмерной модели подстилающей поверхности с наложением на нее видеокадров дополнительно позволяет упростить процедуру забора пробы при управлении от человека-оператора.

Для алгоритмов стерео реконструкции подстилающей поверхности крайне важным аспектом является точное определение взаимного положения камер (точек съемки). В классической задаче стерео реконструкции используются две камеры, разнесенные на некоторое расстояние друг относительно друга, именуемое стерео базой. Для определения их взаимного положения используются специальные шаблоны и алгоритмы калибровки. Стерео калибровка производится один раз, при условии неизменяемости взаимного положения камер.

При использовании одной телевизионной камеры, установленной на манипуляторе, расчет взаимного положения камеры в различных положениях манипулятора производится исходя из решения прямой задачи кинематики манипулятора. Вследствие наличия люфтов в сочленениях манипулятора, а также неточного определения матрицы перехода из системы координат (СК) конечного звена манипулятора в СК оптического центра камеры возникают ошибки при определении взаимного положения камеры. Для уточнения матрицы перехода между положениями камеры предложен алгоритм вычисления уточняющей матрицы перехода с использованием специального калибровочного шаблона. Натурные эксперименты показали, что использование полученной уточняющей матрицы перехода обеспечивает более высокую плотность восстановления трехмерной подстилающей поверхности, а также ведет к повышению точности определения точки забора пробы грунта.

Ключевые слова: стерео зрение, забор пробы грунта в рабочей зоне манипулятора.

Для обеспечения безопасного забора пробы грунта с помощью манипулятора, было предложено использование телевизионной камеры, расположенной на манипуляторе, для определения трехмерных координат подстилающей поверхности. Решение о взятии пробы грунта из определенной области принимается на основе полученных трехмерных координат рабочей области, которые позволяют определить наличие выступающих объектов и минимальное расстояние до них.

Общая схема работы системы реконструкции подстилающей поверхности в рабочей зоне манипулятора приведена на рисунке 1.

Рисунок 1 – Общая схема работы системы реконструкции подстилающей поверхности в рабочей зоне манипулятора

Для работы алгоритма реконструкции подстилающей поверхности необходимо минимум два изображения, полученных из двух различных положений манипулятора с камеры, расположенной в оконечной части манипулятора. При этом реконструкция будет производиться только в области перекрытия данных изображений. На рисунке 2 показан пример получения изображений с камеры манипулятора.

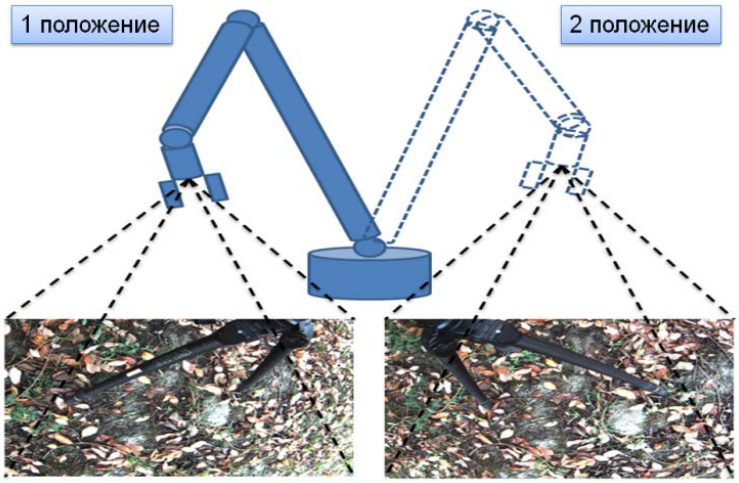


Рисунок 2 – Получение изображений в двух различных положениях манипулятора

В качестве алгоритма реконструкции поверхности в данной работе используется алгоритм стереореконструкции подстилающей поверхности. На вход алгоритма подаются изображения подстилающей поверхности, полученные в различных положениях манипулятора (в данном случае в 2 положениях), параметры внутренней калибровки камеры (фокусное расстояние, пиксельные координаты принципиальной точки, коэффициенты дисторсий), координаты манипулятора в 2 положениях для определения матрицы перехода между ними, а также уточняющая матрица перехода

для уточнения матрицы перехода между положениями камеры. На выходе алгоритма получается трехмерное облако точек, которое используется для определения безопасной зоны забора пробы грунта. Для простоты описания алгоритма реконструкции подстилающей поверхности далее будем называть первое положение камеры – камерой 1, а второе положение – камерой 2.

Алгоритм стереореконструкции состоит из 3 последовательных этапов:

1) построчное математическое выравнивание изображений для облегчения поиска соответствия между пикселями, принадлежащими одному и тому же объекту, на двух изображениях. Данная процедура позволяет производить поиск соответствующего пикселя не по всему изображению, а только в соответствующей данным пикселям строке [1];

2) нахождение соответствия между пикселями и расчет значения диспаратности для каждой пары пикселей [2]. Под значением диспаратности понимается величина расхождения (в пикселях) между двумя сопоставленными пикселями 1 и 2 изображений;

3) триангуляция и расчет трехмерных координат точек подстилающей поверхности. На рисунке 3 представлена схема с двумя камерами. Где O_1 и O_2 – оптические центры камер 1 и камеры 2 соответственно, p_1 и p_2 – проекции точки пространства P на плоскости изображений 1 и 2 камер. Из подобия треугольников по формуле (1) вычисляются трехмерные координаты точки P.

$$\begin{cases} Z = \frac{fT}{x_1 - x_2} \\ X = \frac{Zx_1}{f} \\ Y = \frac{Zy_1}{f} \end{cases}, \quad (1)$$

где X, Y, Z – трехмерные координаты точки P, T – расстояние между оптическими центрами камер, f – фокусное расстояние камер, x1-x2 – значение диспаратности.

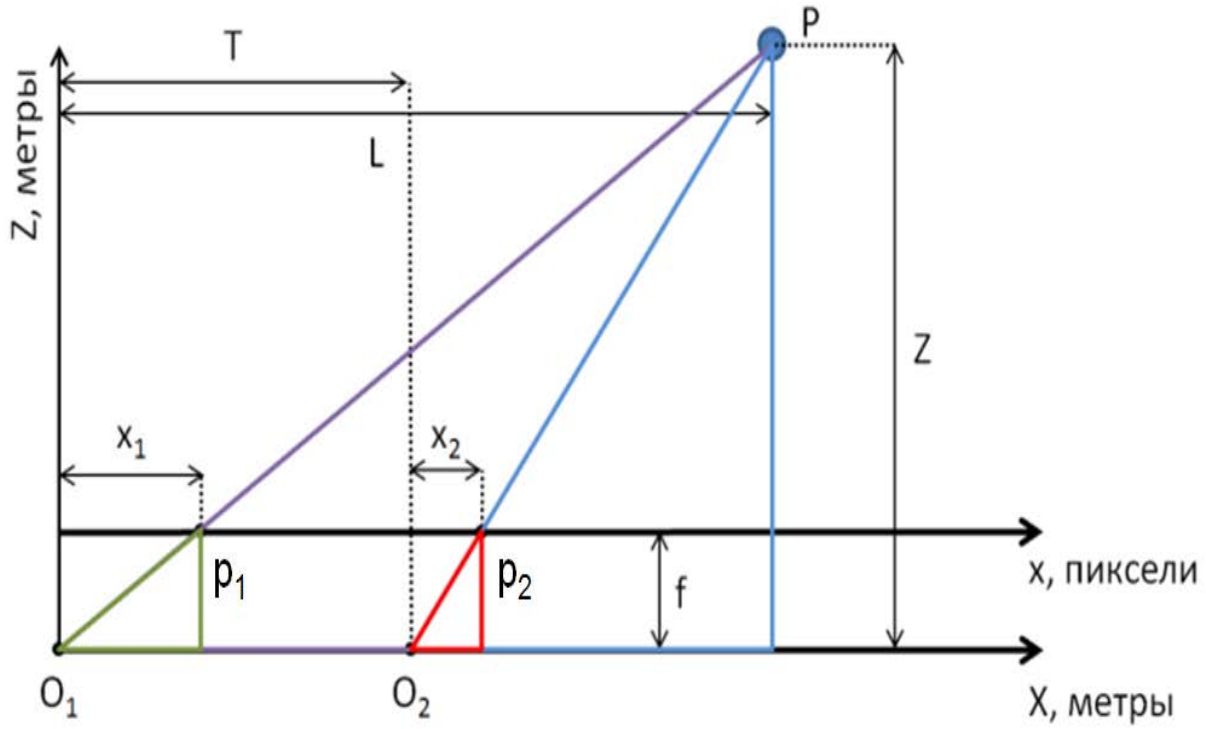


Рисунок 3 – Триангуляция точек

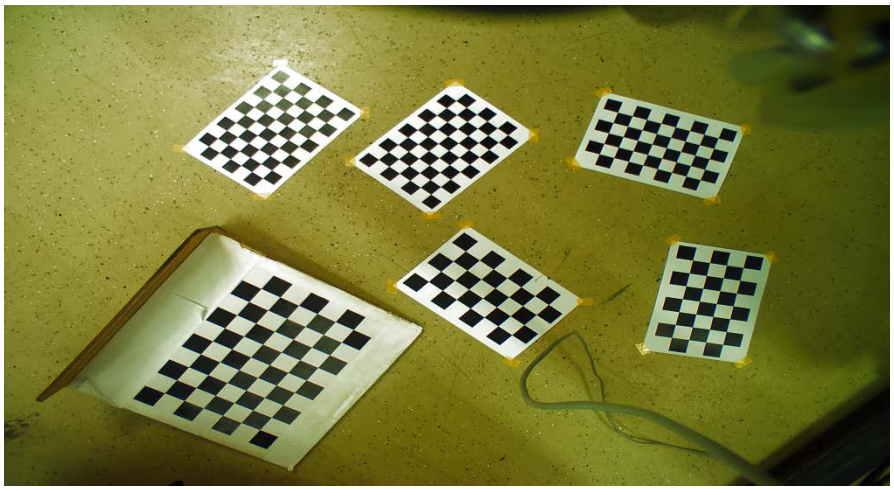
Вследствие наличия люфтов в сочленениях манипулятора, а также неточного определения матрицы перехода из системы координат (СК) конечного звена манипулятора в СК оптического центра камеры возникают ошибки при определении взаимного положения камеры. Поэтому возникают ошибки при математическом выравнивании изображений (пункт 1 алгоритма стереореконструкции). Для уточнения матрицы перехода между положениями камеры предложен алгоритм вычисления уточняющей матрицы перехода с использованием специального калибровочного шаблона (в данном

случае будет использоваться шахматная доска). Суть данного алгоритма заключается в подборе матрицы перехода, которая минимизирует ошибки выравнивания изображений, уточняя при этом матрицу перехода между камерой 1 и 2, полученную исходя из решения прямой задачи кинематики манипулятора.

Алгоритм получения уточняющей матрицы перехода состоит из нескольких этапов:

1) получение нескольких пар кадров специальных калибровочных шаблонов с камеры манипулятора так, чтобы калибровочные шаблоны равномерно покрывали всю рабочую зону манипулятора. При этом, если работа будет производиться с некоторым набором стерео баз, получение пар кадров производится в нескольких различных конфигурациях манипулятора, описывающих весь набор стерео баз. На рисунке 4 показан пример получения пары кадров калибровочных шаблонов;

а)



б)

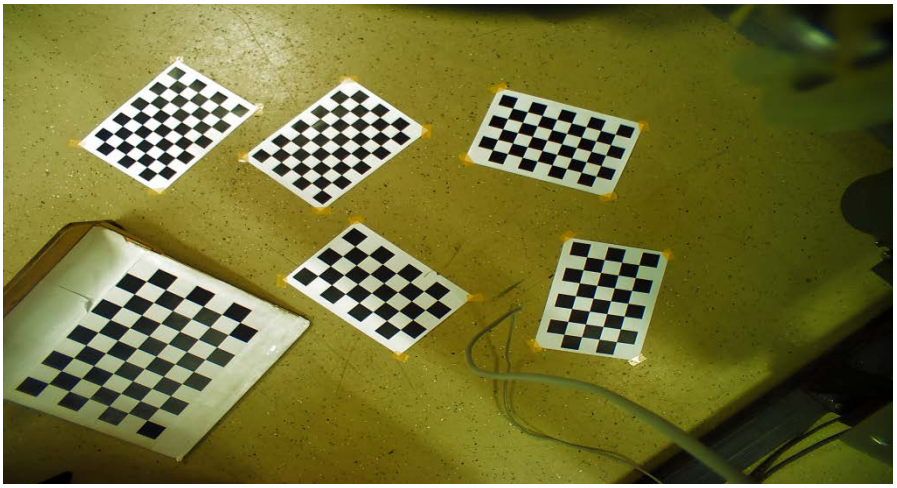


Рисунок 4 – Пример получения пары кадров калибровочных шаблонов (шахматные доски)

2) обнаружение внутренних углов всех шахматных досок на всех парах кадров, а также сопоставление углов досок на обоих кадрах каждой пары;

3) подбор уточняющей матрицы. Для выравнивания пары кадров используется матрица перехода T (формула 2). Уточняющая матрица U применяется к матрице T согласно формуле (3). Далее для выравнивания кадров будет использоваться уже полученная матрица T'.

$$T = \begin{bmatrix} R & t \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \tag{2}$$

где R – матрица поворота между СК первой и второй камеры, t – вектор переноса между СК первой и второй камеры.

$$T' = U * T. \tag{3}$$

Таким образом, с помощью матрицы U происходит переход в новую СК O', уточняющую СК второй камеры с целью улучшения результатов выравнивания пары кадров. Для подбора матрицы U задаются диапазоны по 3 углам поворота, а также по трем компонентам вектора переноса из СК второй камеры в СК O'. Путем полного перебора по каждой из 6 координат (с заданным шагом) происходит подбор наиболее оптимальных параметров. При этом происходит оптимизация по двум критериям: минимизация среднего расстояния для каждой пары найденных углов шахматной доски до эпиполярной линии, соответствующей данной паре точек, и минимизация средней ошибки определения размеров клеток шахматных досок, вычисленных путем триангуляции найденных углов шахматных досок на паре кадров. Для нахождения оптимума по двум заданным критериям, необходимо минимизировать функцию Q (формула 4) варьируя параметры матрицы U.

$$Q = EpError + DistError, \tag{4}$$

где $EpError$ – среднее расстояние от всех найденных углов шахматных досок (в пикселях) до соответствующих им эпиполярным линиям, $DistError$ - средняя ошибка по нахождению размеров клеток шахматных досок (в миллиметрах).

Для определения безопасной зоны забора пробы грунта было предложено построение гистограммы расстояний до ближайших объектов в контрольной зоне, ограниченной параллелепипедом и задаваемой в пределах реконструируемого участка подстилающей поверхности. На рисунке 5 показан пример построения гистограммы расстояний для контрольной зоны, которая отмечена черным прямоугольником. Построенная гистограмма показывает расстояние до ближайших объектов вдоль оси Z, проходящей через оптический центр камеры 1. Левый пик гистограммы свидетельствует о наличие объекта в контрольной зоне, а правый пик показывает расстояние до плоской поверхности (в данном случае до земли). По наличию данных пиков оператор может определить минимальное расстояние до выбранной контрольной зоны, а также судить о ее безопасности для забора пробы грунта.

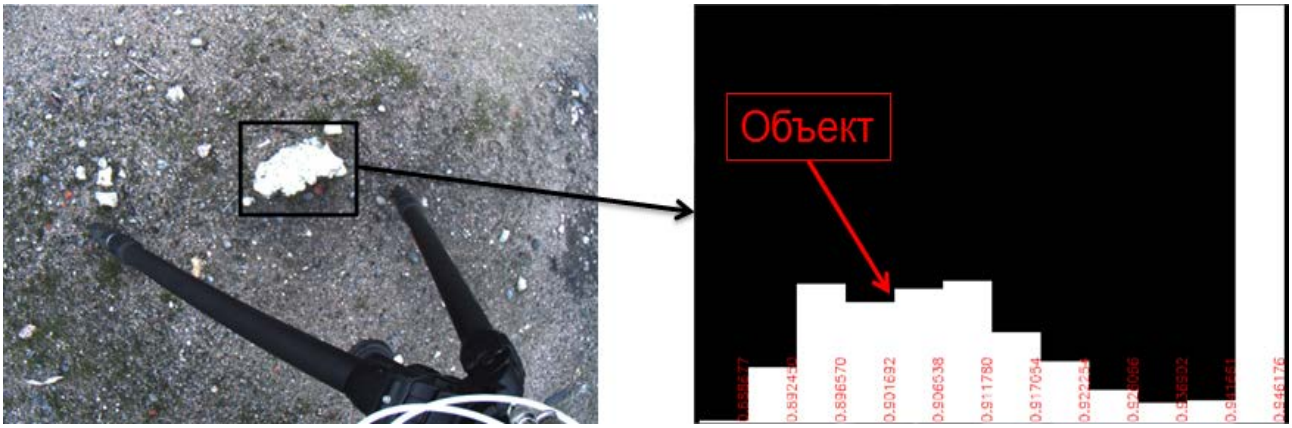
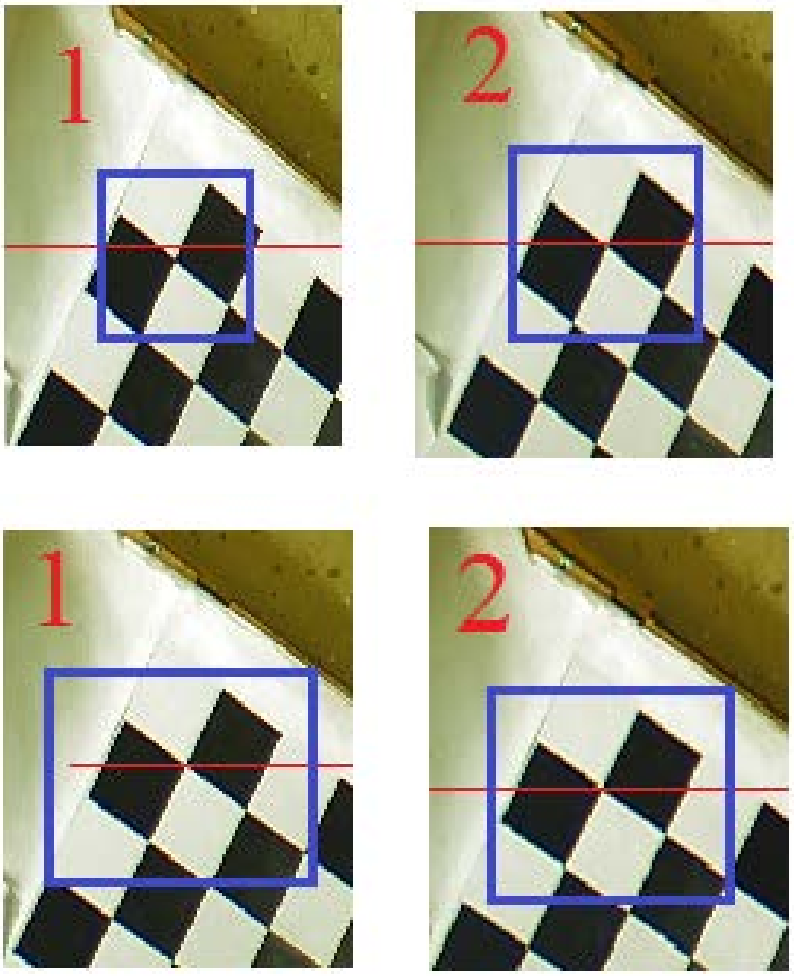


Рисунок 5 – Построение гистограммы расстояний до ближайших объектов в контрольной зоне

Результаты экспериментов

На рисунках 6 а) и 6 б) приведены результаты выравнивания пары кадров до и после применения поправочной матрицы. Из рисунка 6 а) видно, что точка на левом кадре, соответствующая углу шахматной доски, не лежит на эпиполярной линии (показана красной линией) для той же точки с правого кадра. После применения поправочной матрицы расхождение заметно снизилось (рисунок 6 б)).



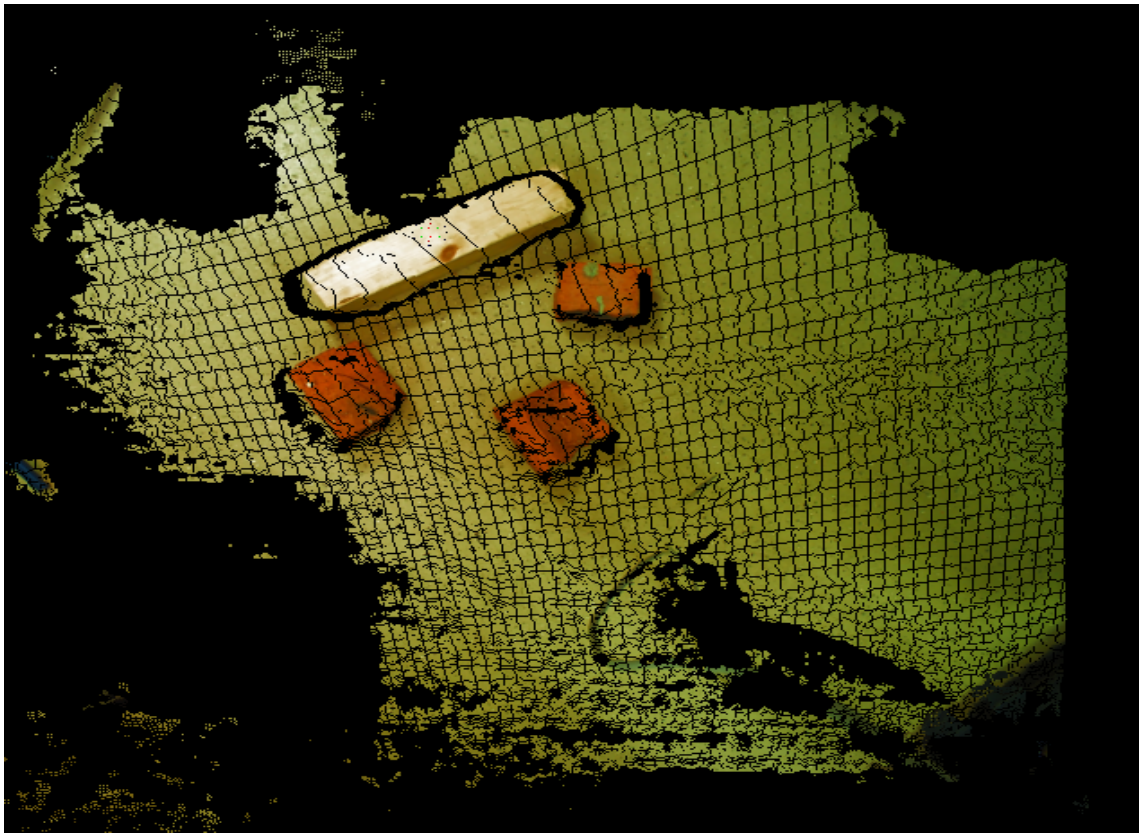
б)

Рисунок 6 – Результат применения поправочной матрицы (а) - результат выравнивания пары кадров до применения поправочной матрицы, б) - результат выравнивания пары кадров после применения поправочной матрицы)

На рисунке 7 приведен результат трехмерной реконструкции подстилающей поверхности до и после применения поправочной матрицы. Видно, что после применения поправочной матрицы плотность восстановленной подстилающей поверхности возросла. На рисунке 8 приведен аналогичный результат трехмерной реконструкции подстилающей поверхности до и после применения поправочной матрицы.

а)

а)



б)

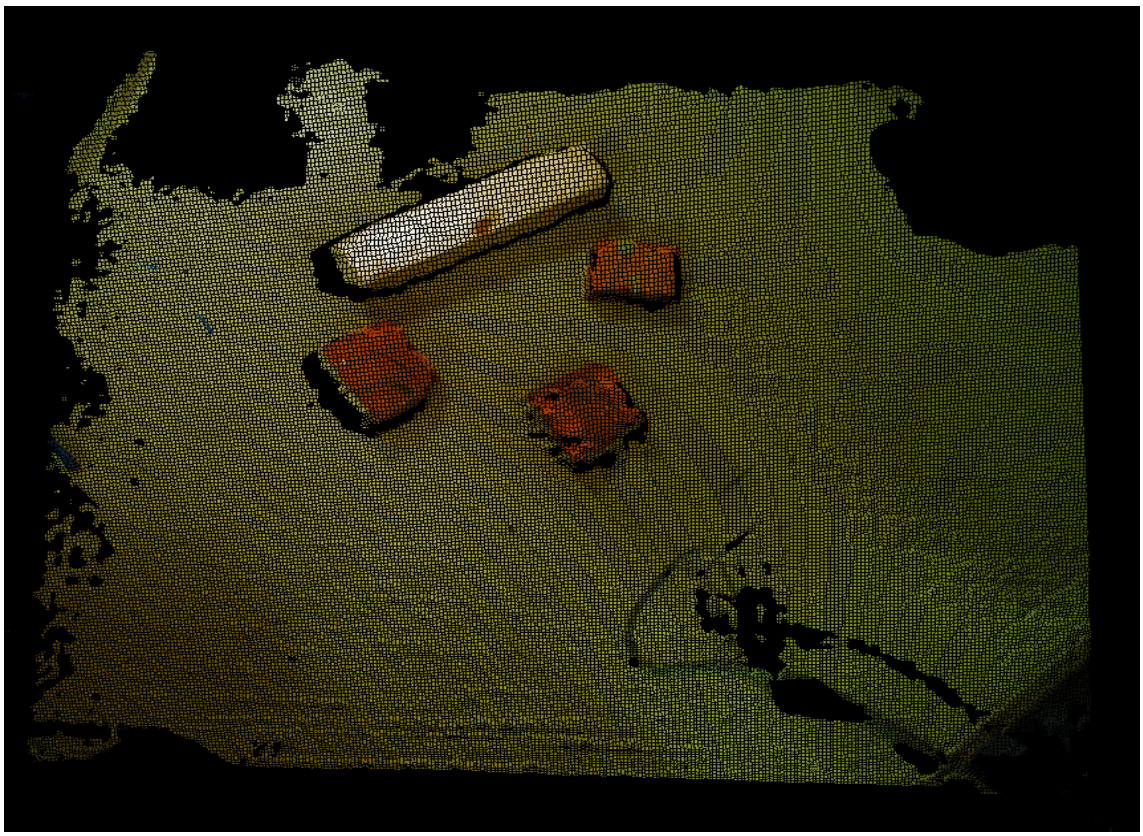


Рисунок 7 – Результат применения поправочной матрицы (а) - результат трехмерной реконструкции подстилающей до применения поправочной матрицы, б) - результат трехмерной реконструкции подстилающей после применения поправочной матрицы)

а)

б)

Рисунок 8 – Результат применения поправочной матрицы (а) - результат трехмерной реконструкции подстилающей до применения поправочной матрицы, б) - результат трехмерной реконструкции подстилающей после применения поправочной матрицы)

1. *Форсайт Д., Понс Ж.* Компьютерное зрение. Современный подход. Пер. с англ. – М. : Издательский дом «Вильямс», 2004. – 928 с.
2. *Hirschmuller H.* Accurate and Efficient Stereo Processing by Semi-Global Matching and Mutual Information // CVPR. – 2005. – Vol. 2. – P. 807-814.

E.P. Grach, N.I. Filippov

APPLICATION OF VL53L0X LASER DISTANCE SENSORS IN OBJECT DETECTION SYSTEMS

College of instrumentation and information technology of
Moscow technological University, Moscow
vader701@mai.ru

Abstract

The article deals with the possibility of detecting extreme obstacles in the form of a small surface area inclined at an angle of 45º polished to a mirror by a low-budget Autonomous mobile system equipped with an array of VL53L0X sensors. The review of functional capabilities of sensors is made, the circuit implementation of system with an array of such sensors is considered, qualitative comparison with similar sensors is made.

Key words: distance sensor, object detection, obstacle detection, low-budget systems.

Application of systems of search of objects and obstacles in low-budget systems can be complicated by rigid requirements on overall and weight parameters, limited computing capacities of Autonomous robotic system. The simplest task is for the quadcopter to detect obstacles in both hemispheres (front and rear) in order to avoid collisions, when using machine vision systems using video cameras, it will require the use of at least six good video cameras and appropriate computing power for image processing and obstacle detection. Not always on Board an Autonomous robotic system has the appropriate computing resources, power supply, reserve for the required dimensions and payload weight.

These sensors are unique in their field of application, they are unpretentious in the application and processing of the readings. The sensors have a size of 4.4x2.4 mm, 30-degree radiation pattern, operating range up to 2 meters, the frequency to 50 Hz. The sensors are connected via I_2C bus and, due to the possibility of changing the program address, can be combined into arrays of up to 127 pieces. Although this will require the use of a large array of circuitry shift registers, but this problem is quite under force even primitive Arduino-compatible controllers with a frequency of 16 MHz.

These sensors return the distance to the obstacle in conventional units, the absolute values of which are declared by the manufacturer as close to millimeters[1], while the accuracy of the measured distance is directly proportional to the time spent on one measurement.

In conditions of real application in extreme conditions, for example, when approaching a wheel robot to a mirror surface at an angle of 45 degrees, the sensor readings are far from the really measured distance, but they are. Alternative sensors for this application (for example Sharp S340K or Sharp A41) in similar conditions produce data that cannot be interpreted by the microcontroller as "there is an object in the field of view". So, optical digital Sharp S340K simply do not notice on the way the mirror located at an angle of 45º to the Central axis of the sensor.

Comparison of sensors by main technical characteristics is given in table 1. The external comparison is shown in Fig.One.

Table 1. Comparative characteristics of the most common distance sensors

Parameter	Sharp S340K [2]	Sharp A41 [3]	VL53L0X [1]
Overall dimensions, mm	15 x 9.6 x 8.7	29,5 x 13,0 x 13,5	4.4 x 2.4 x 1.0
Measured distance, cm	0 - 40	10 - 80	0 - 200
The type of output	Digital	Analog	I_2C
Time of one measurement, MS	8	39	20
The width of the directional diagram, grad	9	9	30

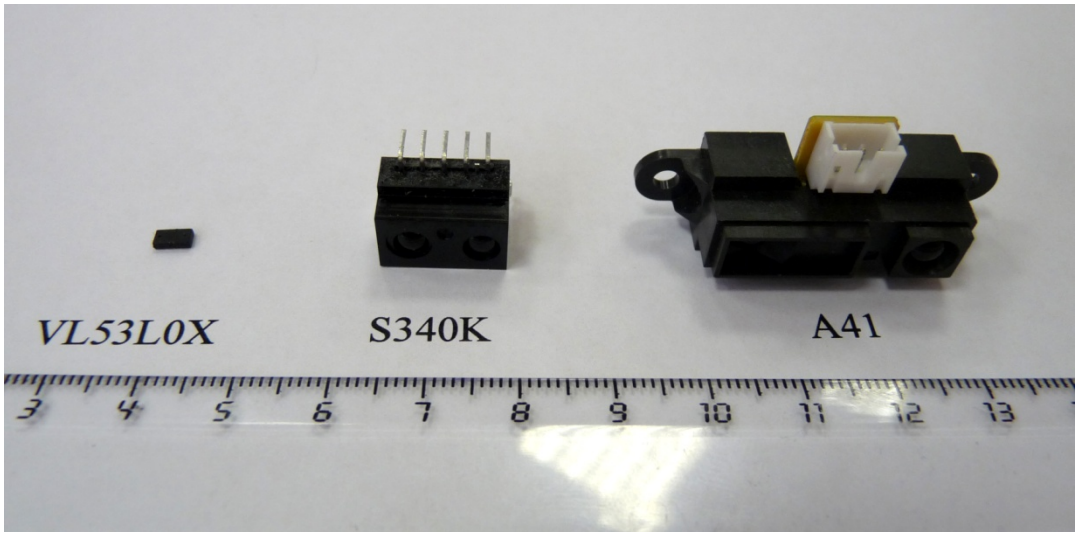


Figure 1 − Dimensions of the VL53L0X sensor in comparison with similar in purpose and application sensors. Centimeter ruler for scale estimation

Using an array of such sensors creates the need to set each of them a unique address on the I_2C bus. When the sensor is turned on, the internal logic of the work sets the address to 0x53. If several sensors are switched on at the same time, the specified address will have several devices at once. The sensor provides a boolean output XSHUT producing software off the sensor. It is for these pins that the use of shift registers is necessary (see Fig.2). The logic is this: all XSHUT pins of all device sensors are in a low logical state. When applying high logic level on digital output XSHUT conventionally, the first gauge, it will have the address 0x53. Software commands set the required mode and change the software address on 0x54. Leaving the digital pins XSHUT the first sensor is HIGH, turn the XSHUT pin of the second sensor to HIGH. The first has the address of 0x54, and the second initialized with the address 0x53. Submission of any commands on the I_2C bus implies the indication of the destination device, so the commands to set the desired operating mode and the command to change the system address are not just on the bus, but signed by the necessary addressee. Therefore, the first sensor (the one who established the address 0x54) teams will take, but will not perform as they are intended not to him. The team will accept and perform the sensor address 0x53, that is the second. In addition to commands to change the mode of operation, send a command to change the address to 0x55. According to this principle, the entire array of sensors is included.

The internal logic of the sensors provides two modes of operation: Single and long-term (Continuous). In single-player mode, the measurement will occur only if the host device of the I_2C bus (master device), which is a microcontroller, receives a command to poll. Only by receiving this command the sensor illuminates the space in front of it with a laser beam and, at the time of arrival of the reflected beam, displays the distance measured to the obstacle. The logic of the work involves two measurements: the first and control, and some processing of the information received, only after which the I_2C bus will leave the answer. In the fastest mode, a single measurement takes 20 ms, when using a single mode of the survey will ensure that the master device during these 20 ms will just hang and not do anything useful. Of course, you can change the logic of the master device with the I_2C bus so that the controller performs useful work during these 20 ms instead of waiting for a response from the sensor, but this is not required, because in continuous mode, the measurements are continuous, and the result of the extreme measurement is recorded in some register of the sensor. When a polling command is sent to a sensor that is in continuous operation, the sensor immediately returns a value that is written to this register without starting the process of a new measurement of the distance to the object.

On a modular device used nine of the considered sensors, the process of polling and processing of indications which, during operation of the I_2C bus within the maximum sensor frequency of 400 kHz, it takes 7.5 ms. If you use more high-speed microcontrollers, this figure can be improved, and therefore, to connect to a single controller more sensors. Of course, the time of one measurement by the sensor of the distance to the object does not change, remaining equal to 20 ms in the fastest mode.

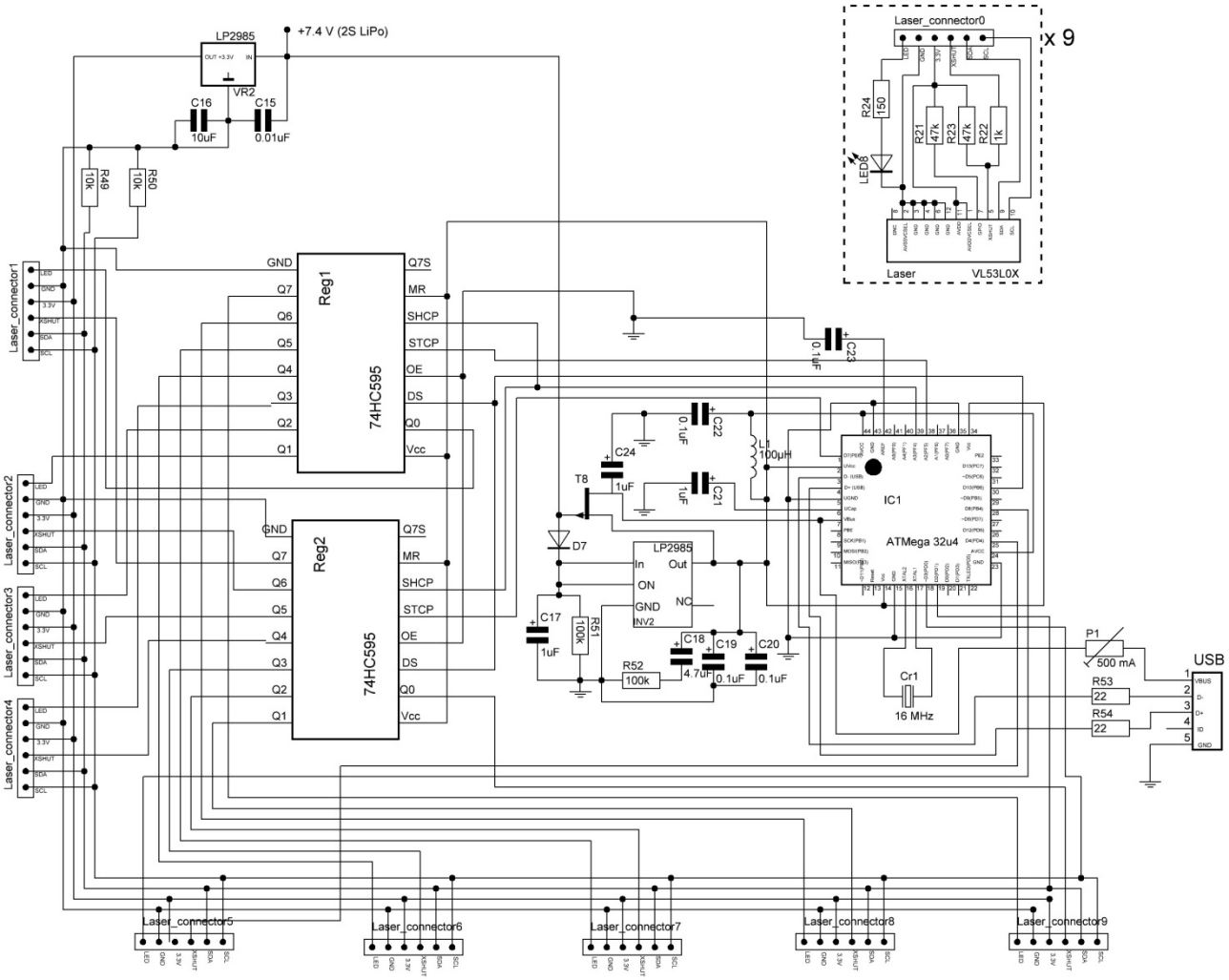


Figure 2 − The scheme of connection of the array of nine VL53L0X sensors to the controller ATMega32u4 using the shift register 74HC595. The second register is used for signal LEDs that are activated when the measured distance is below the threshold set in the control program. The supply voltage of the sensors is 3.3 volts, but on small printed circuit boards, on which the sensor itself is located, there is a resistor R22 to agree with the logical level of the shift register. SHUT and signal led of the fifth sensor (Laser_connector 5) are connected directly to the microcontroller

At the same time, it should be remembered that the accuracy of measurements and the maximum distance of obstacle detection is directly proportional to the time of one measurement. Thus, the detection of a polished mirror surface inclined at an angle of 45 degrees to the Central axis of the sensors producing one measurement per 20 MS occurs from a distance of 40 cm, while the measured distance varies within ±10%.

Model tests were carried out on the example of a mobile Autonomous wheeled robot under the control of an Arduino-compatible controller. On a model object installed 9 sensors V53L0X, coursework three pieces, the six – step chart pattern. Thus, at the rate of movement of the object 210 degrees are blocked (see Fig.3).

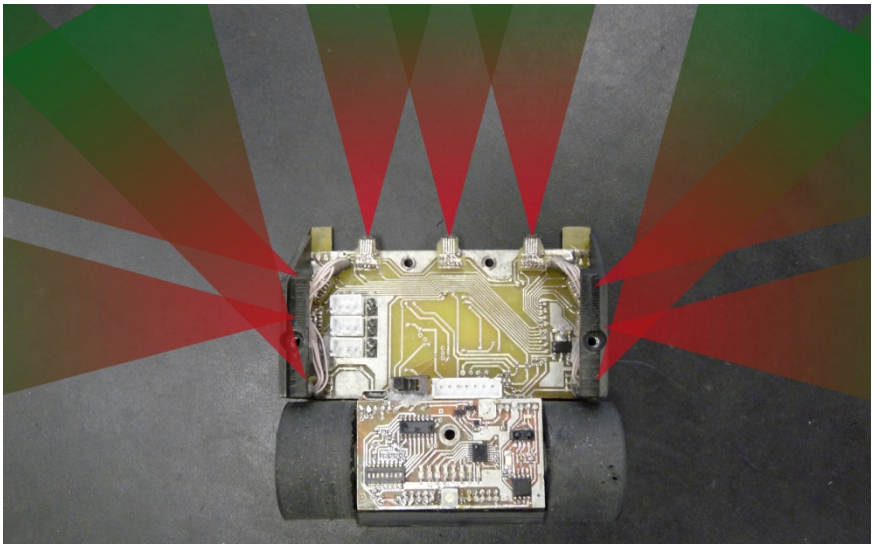


Figure 3 − Schematic representation of the VL53L0X sensor viewing zones on the model device

The program interpreted as "to push out a target for experimental round area with a diameter of 77 cm" is written to the considered object. To complicate the experiment, the most extreme conditions are chosen, the target is also an Autonomous mobile system with similar tasks, but Sharp s340k sensors are used on the target – course and diagonal to the course, Pololu IRS01a - side. The speed of the target and the object-the maximum of what we managed to achieve on wheeled robots (about 17 km/h). The surfaces of both the target and the object are polished to a mirror and tilted at an angle of 45 degrees to the course. In other words, in application to the case with a quadcopter considered at the beginning of the article, "not only the quadcopter moves directly to the mirror, but also the "mirror" by all means strive to collide with the quadcopter." The target and the object have serious limitations both in weight (500 grams) and in size (10 x 10 cm), with most of the mass of the model device are electric motors, housing and batteries. With the integration of a similarly constructed system, the mass of the real device will increase by only 100 grams, that is the mass of the printed circuit Board used in the model device with installed components.

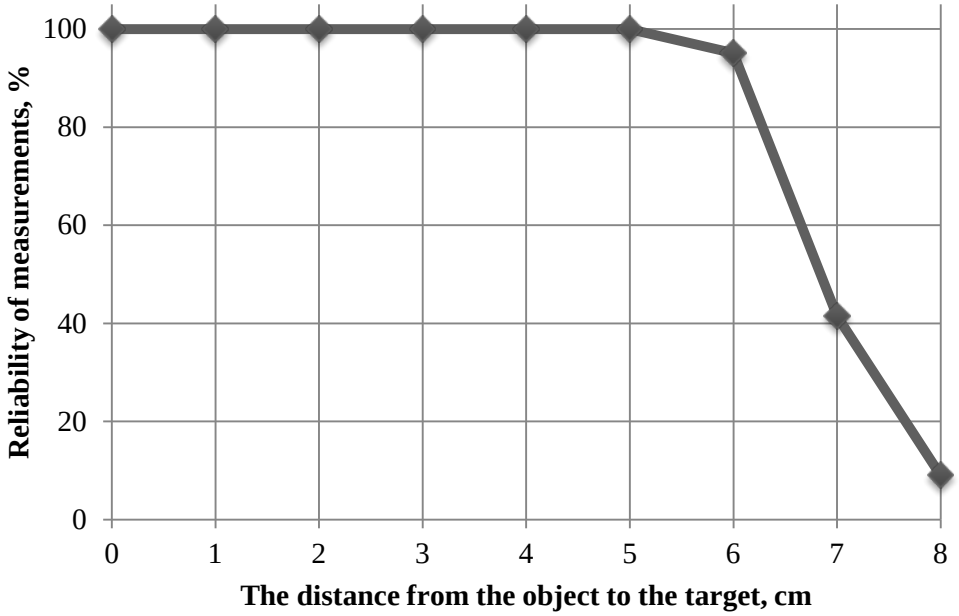


Figure 4 − assessment of the reliability of measurements in each series of 350 measurements estimated number of measurements for which the sensor returns a value of 8192. This numerical value corresponds to the situation when there is no obstacle in the sensor sensitivity zone

If you replace the signs of the direction of rotation of the motors in the control program of the object, it turns out that this experiment simulates the situation of avoiding a collision with an approaching mirror target.

As a result of the experiment, it was found that the target with Sharp S340K sensors can detect an object only by infrared radiation of laser sensors. When sensors are disabled, the Target does not detect the object even closely. Object with installed sensors VL53L0X detects the target from a distance of 20-25 cm, and in this case, as well, an important factor is the infrared radiation of the target sensors.

An additional measurement of the distance from which a single VL53L0X sensor is capable of detecting a mirror surface inclined at an angle of 45 degrees to the Central axis of the sensor is carried out. at a distance of more than 8 cm, the laser sensor is not able to detect the mirror surface. At closer distances with a step of 1 cm 350 measurements were carried out in the fastest possible mode of operation of the sensor. The reliability of the data is shown in Fig.4. Thus, the distance of 6 cm can be considered as a distance of confident detection by laser sensor VL53L0X of mirror obstacle inclined at an angle of 45 degrees to the Central axis of the sensor.

The spread of the readings measured by the sensor is shown in Fig.5. Incorrect measurements for 6-8 cm distances were dropped.

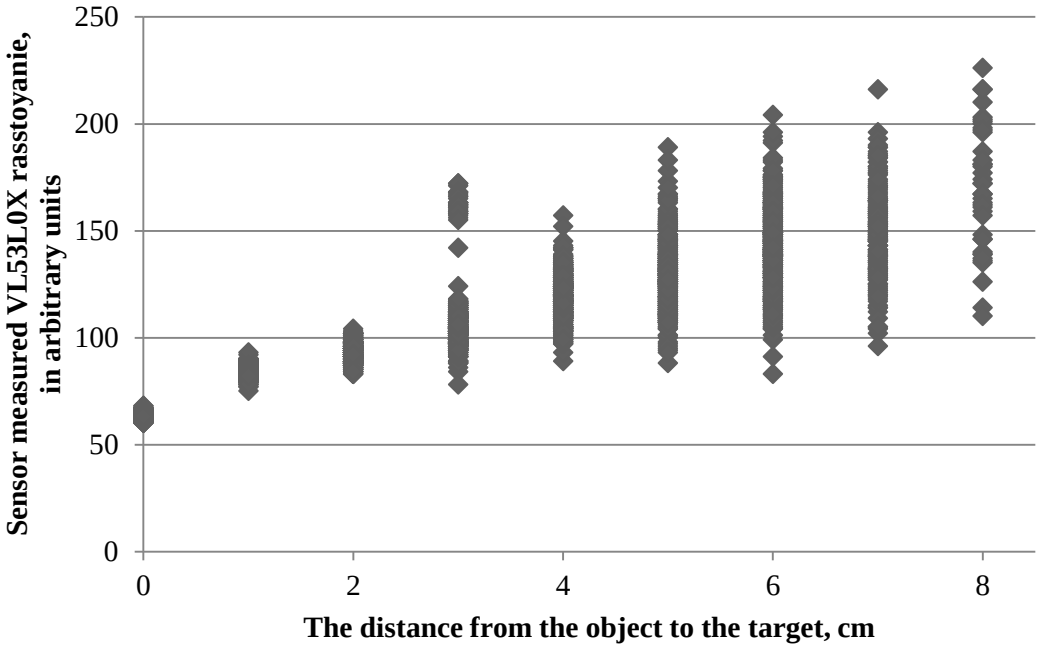


Figure 5 – measured by the distance sensor. In each series of measurements conducted 350 measurements. The graph does not show incorrect measurements at distances of 6-8 cm

Thus, it can be concluded that the use of VL53L0X laser distance sensors in object detection systems is beneficial for reasons of low budget, low volume, low resource consumption, high sensitivity sensors. Particularly worth noting is the new modification of sensor data - VL53L1X, not yet appeared on the market. The manufacturer declared the detection distance from 0 to 400 cm and adjustable directional diagram in the range from 15 to 32 degrees.

1. STMicrielectrionc - **VL53L0X**: World smallest Time-of-Flight ranging and gesture detection sensor // Product Specifications (Datasheet) http://www.st.com
2. Sharp - Distance Measuring Sensor GP2Y0D340K // Product Specifications (Datasheet) http://www.sharp-world.com/
3. Sharp - Distance Measuring Sensor GP2Y0A41SK0F // Product Specifications (Datasheet) http://www.sharp-world.com/

Е.П. Грач, Н.И. Филиппов

ПРИЕНЕНИЕ ЛАЗЕРНЫХ ДАТЧИКОВ РАССТОЯНИЯ VL53L0X В СИСТЕМАХ ОБНАРУЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ

Колледж приборостроения и информационных технологий
Московского технологического Университета, г.Москва
vader701@mail.ru

Аннотация

В статье рассматривается возможность обнаружения малобюджетной автономной мобильной системой, оснащенной массивом датчиков VL53L0X, экстремальных препятствий в виде полированной до зеркала наклоненной под углом 45º поверхности малой площади. Производится обзор функциональных возможностей датчиков, рассматривается схемотехническая реализация системы с массивом таких датчиков, производится качественное сравнение с аналогичными датчиками.

Ключевые слова: датчик расстояния, обнаружение объектов, обнаружение препятствий, малобюджетные системы.

Применение систем поиска объектов и препятствий в малобюджетных системах может быть осложнено жесткими требованиями по габаритным и весовым параметрам, ограниченными вычислительными мощностями автономной робототехнической системы. Простейшая задача – обнаружение квадрокоптером препятствий в обеих полусферах (передней и задней) с целью предотвращения столкновений, при использовании систем машинного зрения, использующих видеокамеры, потребует применения как минимум шести хороших видеокамер и соответствующих вычислительных мощностей для обработки изображения и поиска препятствий. Не всегда на борту автономной робототехнической системы есть соответствующие вычислительные ресурсы, запас мощности источника питания, запас по необходимым габаритам и весу полезной нагрузки.

Рассматриваемые датчики являются уникальными в своей сфере применения, являются неприхотливыми в применении и обработке показаний. Датчики имеют размер 4.4x2.4 мм, 30-градусную диаграмму направленности, рабочий диапазон до 2-х метров, частоту до 50 Гц. Датчики подключаются по шине I_2C и, в силу, заложенной возможности изменения программного адреса, могут быть объединены в массивы до 127 штук. Хотя это и потребует схемотехнического применения крупного массива сдвиговых регистров, но данная задача вполне под силу даже примитивным Arduino-совместимым контроллерам с частотой работы 16 МГц.

Данные датчики возвращают расстояние до препятствия в условных единицах, абсолютные значения которых заявлены производителем как близкие к миллиметрам[1], при этом точность измеренного расстояния прямо пропорциональна затраченному на один замер времени.

В условиях реального применения в экстремальных условиях, например при приближении колесного робота к зеркальной поверхности, находящейся под углом 45 градусов, показания датчика далеки от реально измеренного расстояния, но они есть. Альтернативные датчики данной сферы применения (например Sharp S340K или Sharp A41) в аналогичных условиях выдают данные, которые невозможно интерпретировать микроконтроллером как «есть объект в зоне обзора». Так, оптические цифровые Sharp S340K просто не замечают на пути зеркало, расположенное под углом 45º к центральной оси датчика.

Сравнение датчиков по основным техническим характеристикам приведено в таблице 1. Внешнее сравнение приведено на рис.1

Таблица 1. Сравнительные характеристики наиболее распространенных датчиков расстояния

Параметр	Sharp S340K [2]	Sharp A41 [3]	VL53L0X [1]
Габаритные размеры, мм	15 x 9.6 x 8.7	29,5 x 13,0 x 13,5	4.4 x 2.4 x 1.0
Измеряемое расстояние, см	0 - 40	10 - 80	0 - 200

Тип выходного сигнала	цифровой	аналоговый	I_2C
Время одного измерения, мс	8	39	20
Ширина диаграммы направленности, град	9	9	30

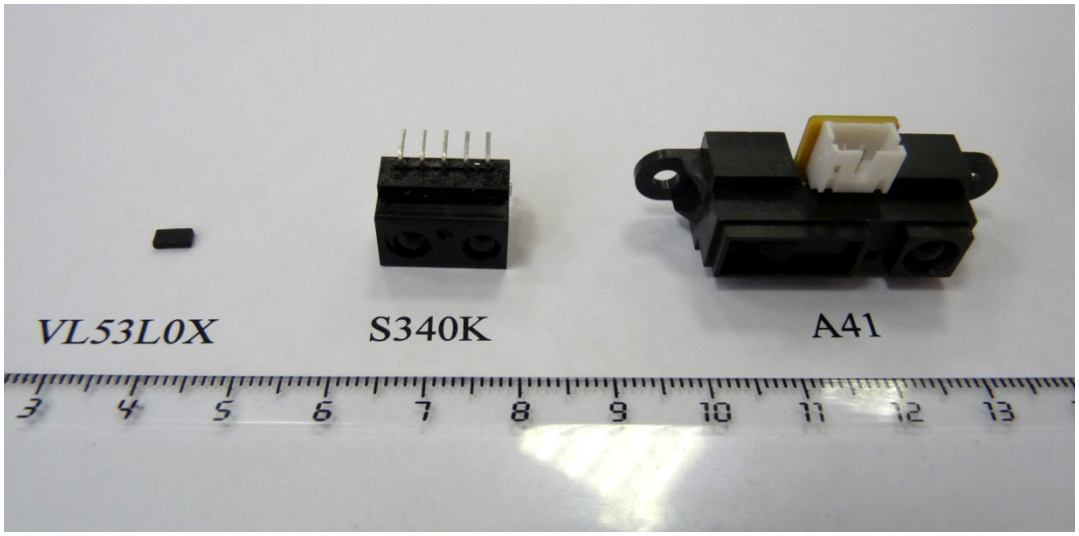


Рисунок 1 − Габариты датчика VL53L0X в сравнении с аналогичными по назначению и применению датчиками. Сантиметровая линейка для оценки масштаба

Использование массива таких датчиков создает необходимость задания каждому из них уникального адреса на шине I_2C. При включении датчика, внутренняя логика работы задает ему адрес 0x53. Если одновременно включены несколько датчиков, то указанный адрес будут иметь сразу несколько со устройств. В датчиках предусмотрен логический вывод XSHUT, производящий программное отключение датчика. Именно для этих пинов и необходимо использование сдвиговых регистров (см.рис.2). Логика такая: все пины XSHUT всех датчиков устройств находятся в низком логическом состоянии. При подаче высокого логического уровня на цифровой вывод XSHUT условно первого датчика, он будет иметь адрес 0x53. Программными командами задаем необходимый режим работы и меняем программный адрес на 0x54. Оставляя на цифровом пине XSHUT первого датчика состояние HIGH, переводим пин XSHUT второго датчика в состояние HIGH. Первому уже присвоен адрес 0x54, второй инициализировался с адресом 0x53. Подача любых команд по шине I_2C подразумевает указание устройства-адресата, поэтому команды на установление нужного режима работы и команда на смену системного адреса идут не просто по шине, а подписаны необходимым адресатом. Именно поэтому первый датчик (тот, которому установлен адрес 0x54) команды примет, но не исполнит, т.к. они предназначаются не ему. Команды примет и исполнит датчик с адресом 0x53, то есть второй. Помимо команд на смену режима работы, посылаем команду на смену адреса на 0x55. По такому принципу включается весь массив датчиков.

Внутренняя логика работы датчиков предусматривает два режима работы: одиночный (Single) и продолжительный (Continuous). В одиночном режиме замер произойдет только в том случае, если с ведущего устройства шины I_2C (мастер-устройства), которым является микроконтроллер, придет команда на опрос. Только по приему этой команды датчик производит подсветку лазерным лучом пространства перед собой и, по времени прихода отраженного луча, выдает измеренное до препятствия расстояние. Логика работы подразумевает два замера: первое и контрольное, и некоторую обработку полученной информации, только после которой в шину I_2C уйдет ответ. В наиболее быстром режиме работы одно измерение занимает 20 мс, что при использовании одиночного режима опроса приведет тому, что ведущее устройство в течение этих 20 мс будет просто висеть и не делать ничего полезного. Конечно, можно изменить логику работы ведущего устройства с шиной I_2C, чтобы контроллер в течение этих 20 мс производил полезную работу, а не ждал ответа от датчика, но это не

требуется, т.к. в продолжительном (Continuous) режиме работы датчиков измерения идут постоянно, а результат крайнего измерения записан в некотором регистре самого датчика. Когда на датчик, работающий в продолжительном режиме работы, приходит команда на опрос, датчик тут же возвращает значение, которое записано в этом регистре, не начиная процесс нового измерения расстояния до объекта.

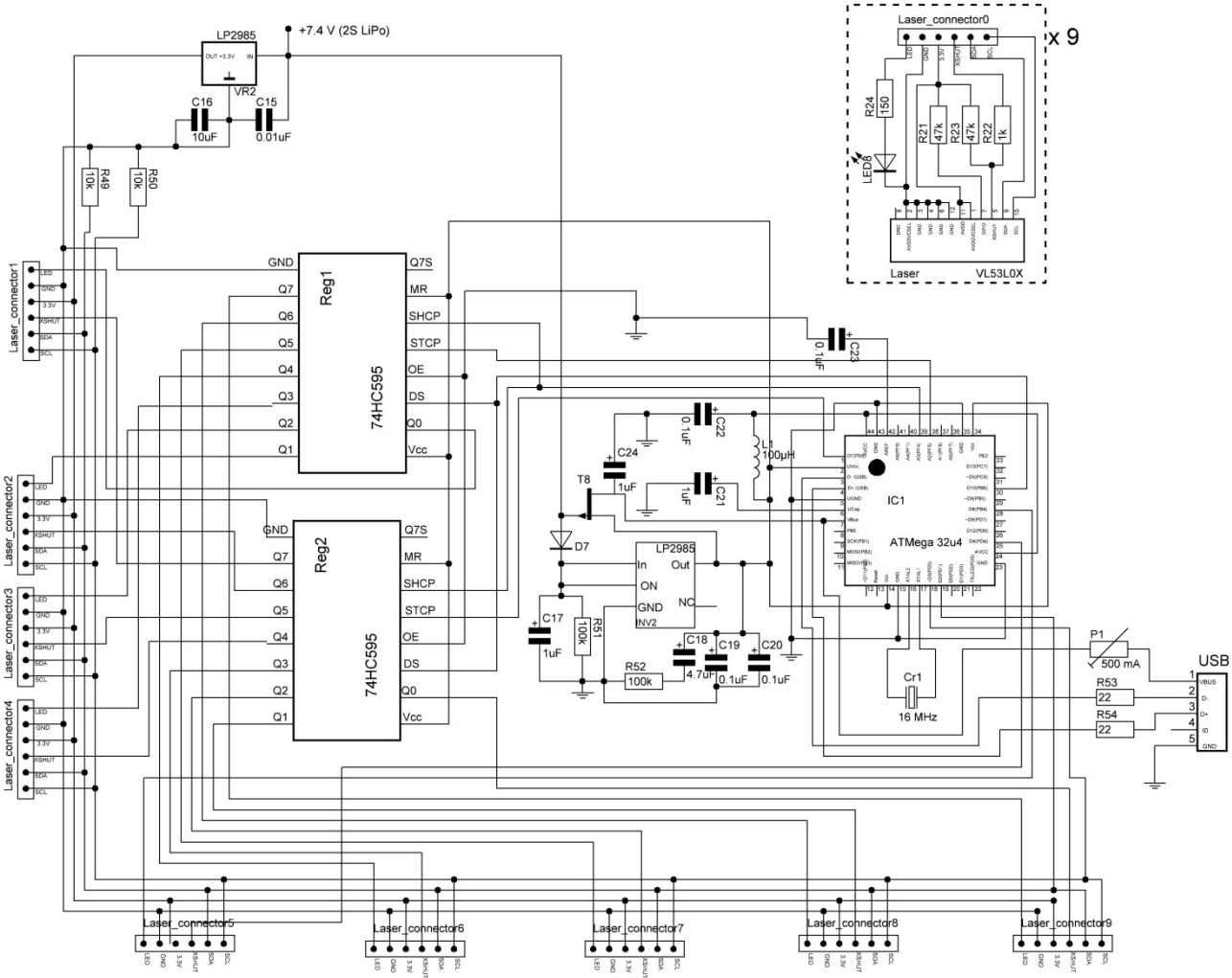


Рисунок 2 − Схема подключения массива из девяти датчиков VL53L0X к контроллеру ATMega 32u4 с использованием сдвигового регистра 74HC595. Второй регистр используется для сигнальных светодиодов, срабатывающих, если измеренная дистанция ниже установленного в программе управления порогового значения. Напряжение питания датчиков 3.3 вольт, однако на малых печатных платах, на которых расположен сам датчик, предусмотрен резистор R22 для согласования с логическим уровнем сдвигового регистра. XSHUT и сигнальный светодиод пятого датчика (Laser_connector5) подключены непосредственно к микроконтроллеру

На модельном устройстве использовано девять рассматриваемых датчиков, процесс опроса и обработки показаний которых, при работе шины I_2C на максимально допустимой для датчиков частоте 400 кГц, занимает 7,5 мс. При использовании более скоростных микроконтроллеров данный показатель можно улучшить, а значит, подключать к одному контроллеру большее количество датчиков. Конечно, время одного измерения датчиком расстояния до объекта при этом не меняется, оставаясь равным 20 мс в наиболее быстром режиме работы.

При этом следует помнить, что точность измерений и максимальная дистанция обнаружения препятствия прямо пропорциональна времени одного измерения. Так, обнаружение полированной зеркальной поверхности, наклоненной под углом 45 градусов к центральной оси датчиков, производящих одно измерение за 20 мс, происходит с расстояния 40 см, при этом измеренное расстояние колеблется в пределах ±10%.

Проведены модельные испытания на примере мобильного автономного колесного робота под управлением Aduino-совместимого контроллера. На модельном объекте установлено 9 датчиков V53L0X, курсовых три штуки, остальные шесть – с шагом диаграммы направленности. Таким образом, по курсу движения объекта перекрыто 210 градусов (см. рис.3).

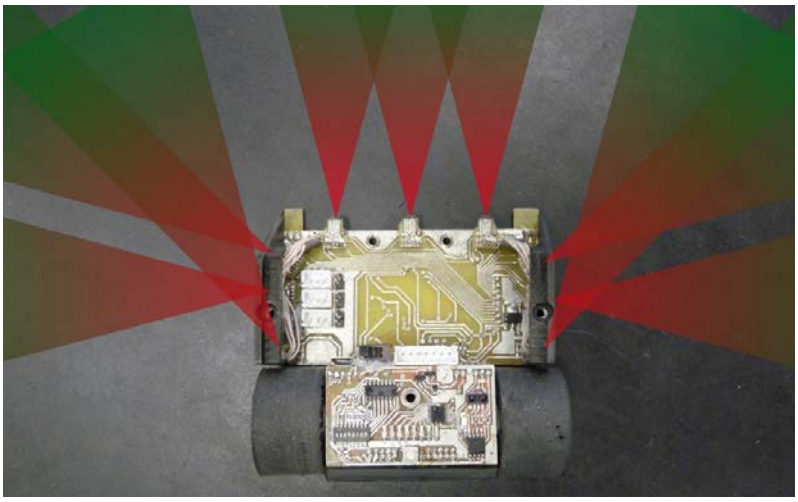


Рисунок 3 − Схематичное изображение зон обзора датчиков VL53L0X на модельном устройстве

Рассматриваемому объекту написана программа, интерпретируемая как «вытолкнуть мишень за экспериментальную круглую область диаметром 77 см». Для усложнения эксперимента, выбраны максимально экстремальные условия, мишень является так же автономной мобильной системой с аналогичными задачами, но на мишени использованы датчики Sharp S340K – курсовые и диагональные к курсу, Pololu IRS01a - боковые. Скорости мишени и объекта – максимальные из того, что нам удалось добиться на колесных роботах (около 17 км/ч). Поверхности и мишени, и объекта полированы до зеркала и наклонены под углом 45 градусов к курсу. Иначе говоря, в применении к рассмотренному в начале статьи случаю с квадрокоптером, «не только квадрокоптер напрямую движется к зеркалу, но и «зеркало» всеми средствами стремиться столкнуться с квадрокоптером». Мишень и объект имеют серьезные ограничения как по весу (500 грамм) так и по габаритам (10 х 10 см), при этом бóльшей частью массы модельного устройства являются электродвигатели, корпус и аккумуляторы. При интеграции аналогично построенной системы, масса реального устройства увеличится всего на 100 грамм, именно такова масса использованной в модельном устройстве печатной платы с установленными компонентами.

Рисунок 4 − Оценка достоверности измерений в каждой серии из 350-ти измерений оценивалось количество измерений, при которых датчик возвращал значение 8192. Это числовое значение соответствует ситуации, когда в зоне чувствительности датчика нет препятствия

Если заменить в программе управления объектом знаки направления вращения моторами, то получиться, что данный эксперимент моделирует ситуацию избегания столкновения с надвигающейся зеркальной мишенью.

В результате проведенного эксперимента удалось обнаружить, что мишень с датчиками Sharp S340K способна обнаружить объект только за счет инфракрасного излучения лазерных датчиков. При отключенных датчиках Мишень не обнаруживает объект даже вплотную. Объект с установленными датчиками VL53L0X обнаруживает мишень с расстояния 20-25 см, и в этом случае, так же, существенным фактором является инфракрасное излучение датчиков мишени.

Проведено дополнительное измерение расстояния, с которого одиночный датчик VL53L0X способен обнаружить зеркальную поверхность, наклоненную под углом 45 градусов к центральной оси датчика. На расстоянии свыше 8 см лазерный датчик не способен обнаружить зеркальную поверхность. На более близких расстояниях с шагом 1 см проведено по 350 замеров в максимально быстром режиме работы датчика. Достоверность полученных данных приведена на рис.4. Таким образом, дистанцию 6 см можно считать дистанцией уверенного обнаружения лазерным датчиком VL53L0X зеркального препятствия, наклоненного под углом 45 градусов к центральной оси датчика.

Разброс измеренных датчиком показаний приведен на рис.5. Отброшены некорректные измерения для дистанций 6-8 см.

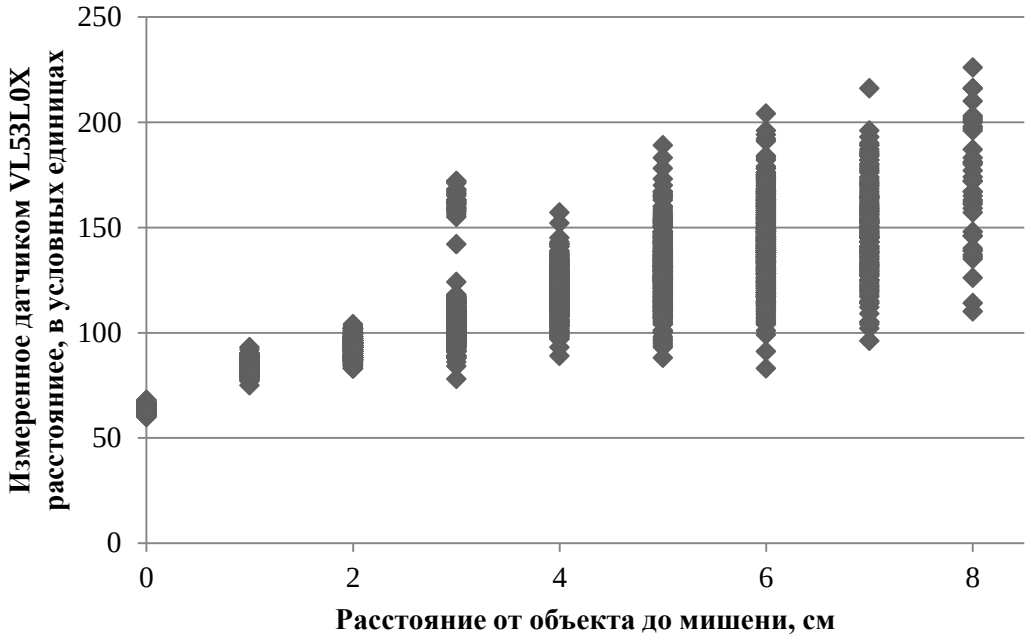


Рисунок 5 – Измеренные датчиком расстояния. В каждой серии измерений проводилось 350 замеров. На графике не отображены некорректные измерения на дистанциях 6-8 см

Таким образом, можно сделать вывод, что применение лазерных датчиков расстояния VL53L0X в системах обнаружения объектов выгодно является выгодным по причинам малобюджетности, малого занимаемого объема, малого ресурсопотребления, большой чувствительности датчиков. Особо стоит отметить новую модификацию данных датчиков - VL53L1X, не появившиеся еще на рынке. Производителем заявлена дистанция обнаружения от 0 до 400 см и регулируемая диаграмма направленности в диапазоне от 15 до 32 градусов.

1. STMicrielectrionc - **VL53L0X**: World smallest Time-of-Flight ranging and gesture detection sensor // Product Specifications (Datasheet) http://www.st.com
2. Sharp - Distance Measuring Sensor GP2Y0D340K // Product Specifications (Datasheet) http://www.sharp-world.com/
3. Sharp - Distance Measuring Sensor GP2Y0A41SK0F // Product Specifications (Datasheet) http://www.sharp-world.com/

S.D. Likhonosov, N.A. Protsenko, V.P. Kulyga, A.N. Petrov,
I.V. Gorbacheva, S.I. Shchekoldin

AUTONOMOUS POWER SOURCES OF PJSC "SATURN" AND THEIR APPLICATION IN ROBOTIC SYSTEMS

Saturn PJSC
info@saturn-kuban.ru

Annotation

The high dynamics of increasing demand for lithium-ion storage batteries (LISB) is due to the obvious advantages of this type of chemical current sources (CCS): high specific energy, low self-discharge, no need for frequent maintenance, ease of operation, practically no memory effect.

Such criteria for choosing the type of independent power supply predetermine the use of lithium-ion cells in the design of robotic systems.

Since 2005 Saturn PJSC has been developing parametric line of Lithium-ion prismatic cells from 10 A·h to 120 A·h, and batteries on their base.

Saturn PJSC is developing production in the direction of improving the operational characteristics of the LISB of space application, and expanding the scope of the products use. The enterprise has a scientific and technical groundwork allowing carrying out work on the development, manufacture and qualification of lithium-ion cells with a specific energy of more than 200 Wh / kg. The works aimed at expanding the operational temperature range of LIC and SB on their base will increase the potential scope of their application in robotic systems, special-purpose devices, communications means, etc. The decisions made when creating a power cell should find use in unmanned aerial vehicles (drone aircraft) which are being developed in most cases with an orientation toward foreign manufacturers of power supplies.

Key words: Lithium-ion cell, storage battery, specific energy, operating temperature range, power cell, starter aircraft battery.

С.Д. Лихоносов, Н.А. Проценко, В.П. Кулыга, А.Н. Петров,
И.В. Горбачева, С.И. Щеколдин

АВТОНОМНЫЕ ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ ПАО «САТУРН» И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ.

ПАО «Сатурн», г. Краснодар
bnti@saturn-kuban.ru

Аннотация

Высокая динамика роста потребности в литий-ионных аккумуляторных батареях (ЛИАБ) связана с безусловными преимуществами данного типа химических источников тока (ХИТ): высокой удельной энергией, низким саморазрядом, отсутствием необходимости частого обслуживания и удобством эксплуатации, практическим отсутствием эффекта памяти.

Такие критерии выбора типа автономного источника питания предопределяют применение литий-ионных аккумуляторов при проектировании робототехнических комплексов.

Работы по созданию параметрического ряда литий-ионных аккумуляторов емкостью от 10 А·ч до 120 А·ч призматической формы и батарей на их основе на ПАО «Сатурн» ведутся с 2005 года.

ПАО «Сатурн» осуществляет развитие производства в сторону улучшения эксплуатационных характеристик ЛИАБ космического применения и расширения области применения выпускаемой продукции. На предприятии имеется научно-технический задел позволяющий обеспечить проведение работ по разработке, изготовлению и квалификации литий-ионных аккумуляторов с удельной энергией более 200 Втч/кг. Работы, направленные на расширение температурного диапазона эксплуатации ЛИА и АБ на их основе позволят увеличить потенциальную область их применения в робототехнических комплексах, приборах специального назначения, средствах связи и т.п. Решения, принятые при создании мощностного аккумулятора должны найти применение в беспилотных летательных аппаратах (дронах), разработка которых ведется в большинстве случаев с ориентацией на зарубежных производителей источников питания.

Ключевые слова: литий-ионный аккумулятор, аккумуляторная батарея, удельная энергия, диапазон рабочих температур, мощностной аккумулятор, стартерная авиационная батарея.

В настоящее время литий-ионные аккумуляторы (ЛИА) получили наиболее широкое распространение в современной технике. Первый ЛИА был произведен корпорацией Sony в 1991 году, и к настоящему времени мировая потребность в литий-ионных источниках тока достигла 100 ГВт·ч [1]. Столь высокая динамика роста потребности в литий-ионных аккумуляторных батареях (ЛИАБ) связана с безусловными преимуществами данного типа химических источников тока (ХИТ) [2]: высокой удельной (массовой/объемной) энергией, низким саморазрядом, отсутствием необходимости частого обслуживания и удобством эксплуатации, практическим отсутствием эффекта памяти [3].

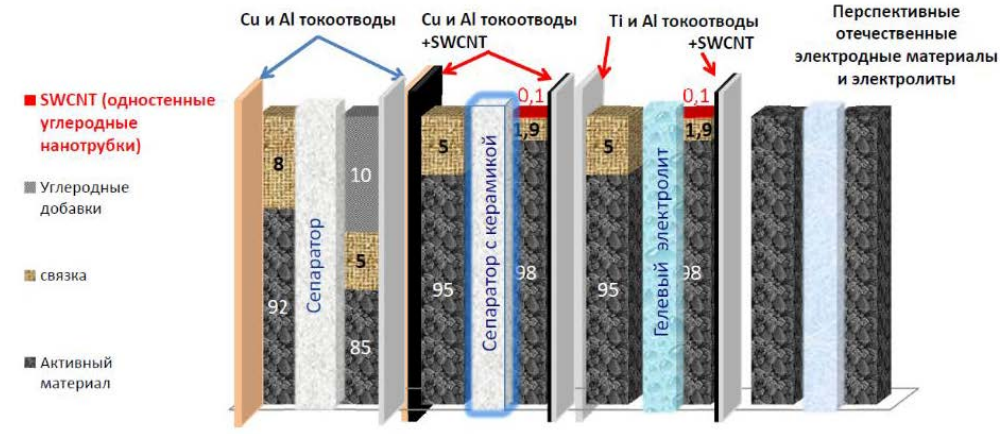
Такие критерии выбора типа автономного источника питания предопределяют применение литий-ионных аккумуляторов при проектировании робототехнических комплексов.

Высокие требования специального и космического применения к удельно-энергетическим характеристикам, а так же малая серийность аккумуляторов задают использование призматической конструкции аккумулятора в производственной деятельности ПАО «Сатурн».Работы по созданию параметрического ряда литий-ионных аккумуляторов емкостью от 10 А·ч до 120 А·ч призматической формы и батарей на их основе на ПАО «Сатурн» ведутся с 2005 года. Активными материалами для аккумуляторов являются: положительный электрод на основе отечественного кобальтата лития (LCO), отрицательный – на основе графита (С). В различных стадиях отработки находятся системы на основе других материалов (LNCMO, LMR-NMC и др.), в том числе отечественного производства.

Первая литий-ионная аккумуляторная батарея (ЛИАБ), созданная в ПАО «Сатурн», с декабря 2008 года проходит летные испытания (летная квалификация) в составе СЭП КА «Глонасс-М». С 2013 года в составе низкоорбитального космического аппарата (КА) проходит летные испытания литий-ионная аккумуляторная батарея 4ЛИ-20, в состав которой интегрировано выравнивающее устройство. Кроме того ЛИАБ успешно эксплуатируются на ряде современных КА: Луч, Благовест, Аист-2. Несколько типов литий-ионных аккумуляторных батарей прошли полную наземную экспериментальную отработку и готовы к летным испытаниям.

ПАО «Сатурн» осуществляет развитие производства в сторону улучшения эксплуатационных характеристик ЛИАБ космического применения и расширения области применения выпускаемой продукции, с использованием полученного в космической деятельности научно-технического задела.

Совершенствование ЛИА космического применения отражено в плане модернизации ЛИА принятом на предприятии в 2016 году, по которому намечен путь повышения удельных характеристик до значений 250 Втч/кг и выше (Рисунок 1).



	2016	2017	2019	2022
Среднеразрядное напряжение, В	3,6	3,75	3,8	3,6
Удельная энергия ЛИА/АБ, Вт·ч/кг	170 / 140	190 / 158	210 / 175	250+ / 210+

Рисунок 1 – План модернизации ЛИА с указанием удельных характеристик литий-ионных аккумуляторов и батарей производства ПАО «Сатурн»

По итогам работ, завершенных в 2017 году, получены макеты аккумуляторов с удельной энергией порядка 190 Втч/кг.

В этих аккумуляторах реализована идея по увеличению доли активного материала за счет уменьшения количества связки и добавления углеродных нанотрубок (УНТ) в качестве электропроводной добавки с существенным увеличением содержания кобальтата лития до 99 % против 85% по существующей технологии. За счет замены марки графита на отрицательном электроде, оптимизированы потери формировочного цикла аккумулятора, что привело к увеличению КПД первого цикла с 87 до 90-95 %. Применена алюминиевая фольга с нанесёнными на поверхность нанотрубками, что снизило электрические потери на границе активного материала катода и токоотвода и привело к повышению среднеразрядного напряжения аккумулятора.

Начальные испытания показали сопоставимость электрохимических характеристик с базовым вариантом. Установлено, что средне разрядное напряжение, электродов с применением нанотрубок выше, чем у электродов базового состава ПАО «Сатурн».

Расширение области применения выпускаемой продукции одна из приоритетных задач предприятия.

Учитывая направленность предприятия, в настоящий момент на ПАО «Сатурн» разворачиваются работы (СЧ ОКР) по разработке ЛИАБ для робота космического назначения, предназначенного для выполнения технологических операций на внешней поверхности космических аппаратов и поддержки экипажа при внекорабельной деятельности с проведением летных испытаний на модуле НЭМ РС МКС (по техническому заданию ЦНИИ РТК). Основные технические характеристики разрабатываемой ЛИАБ представлены в таблице 1.

Таблица 1. Основные–технические характеристики разрабатываемой ЛИАБ

Наименование характеристики	**Значение**
1 Номинальная ёмкость в начале срока службы при нормальной температуре, А·ч, не менее	75,0
2 Номинальная ёмкость в конце срока службы при нормальной температуре, А·ч, не менее	67,5
3 Минимальное выходное напряжение, В, не менее при максимальном токе	42
4 Максимальное выходное напряжение, В, не более	58,8
5 Средний ток разряда сильноточного фидера, А	10,0
6 Средний ток разряда слаботочного фидера, А	5,0
7 Средний ток разряда фидера СОТР, А	5
8 Ток перегрузки разряда сильноточного фидера, А (не более 60 с).	10,1 - 40
9 Ток перегрузки разряда слаботочного фидера, А (не более 60 с	5,1 - 10
10 Ток перегрузки разряда фидера СОТР, А (не более 60 с)	5,1
11 Время полного заряда, часов, не более	16
12 Количество зарядно-разрядных циклов при глубине разряда 85% и уменьшении номинальной емкости не более чем на 20%, более	500
13 Саморазряд в режиме хранения при температуре, %/мес: - плюс 23°С - плюс 45°С	15 35
14 Продолжительность работы при номинальном разрядном токе 10 А, полностью заряженной БАБ, часов, не менее	6
15 Диапазон рабочих температур ЛИАБ: 1) - при разряде°С 2) - при заряде°С	Минус 50 – плюс 50

Учитывая имеющийся научно-технический задел, работы будут выполнены в полном объеме с достижением указанных характеристик.

Аккумуляторы, предназначенные для наземного применения, характеризуются значительно более широким диапазоном рабочих температур. Если аккумуляторы космического применения с высокими требованиями к надежности, автономности и массогабаритным характеристиками, эксплуатируются при относительно щадящих температурных условиях, источники питания для наземного применения имеют противоположные требования. Так для космической техники интервал предпочтительных рабочих температур, которые гарантирует разработчик КА, составляет плюс 5°С плюс 35°С, то для наземной техники диапазон расширяется до минус 40°С плюс 60°С, а в ряде случаев и того шире.

Исходя из этих требований, были проведены ряд работ направленных на разработку электрохимической группы обеспечивающей эксплуатацию аккумулятора при отрицательных температурах. Объектами испытаний являлись 15 макетов ЛИА в ламинатном корпусе емкостью ≈ 2 Ач с различным составом электролита. Целью ставилось: определение характеристик макетов ЛИА с измерением внутреннего сопротивления при температурах плюс 20°С, 0°С, минус 20°С; проведение испытаний на сохраняемость; проведение испытаний на циклический ресурс. На рисунках 3 и 4 представлен ход изменения напряжения разряда на прогоночных циклах.

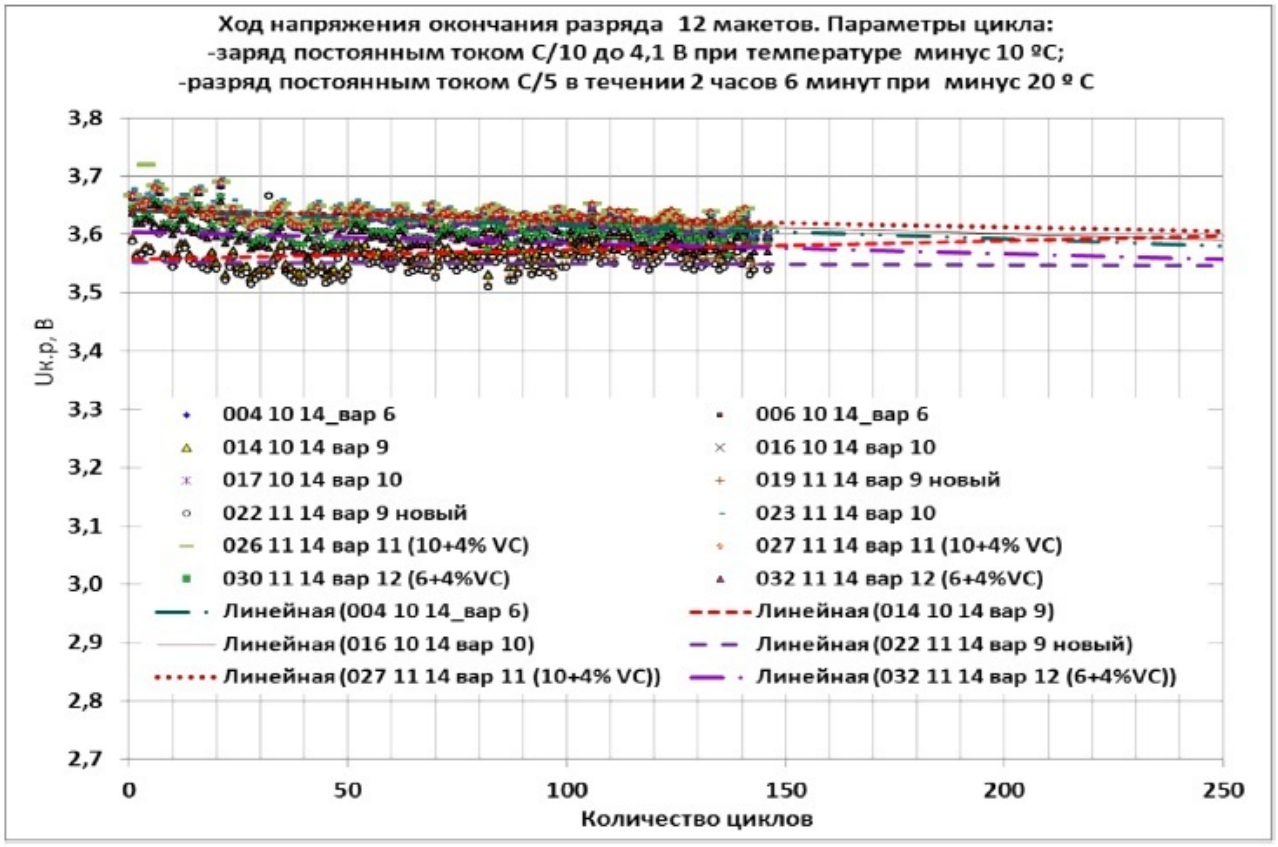


Рисунок 2 – Изменение напряжения окончания разряда на прогоночных циклах

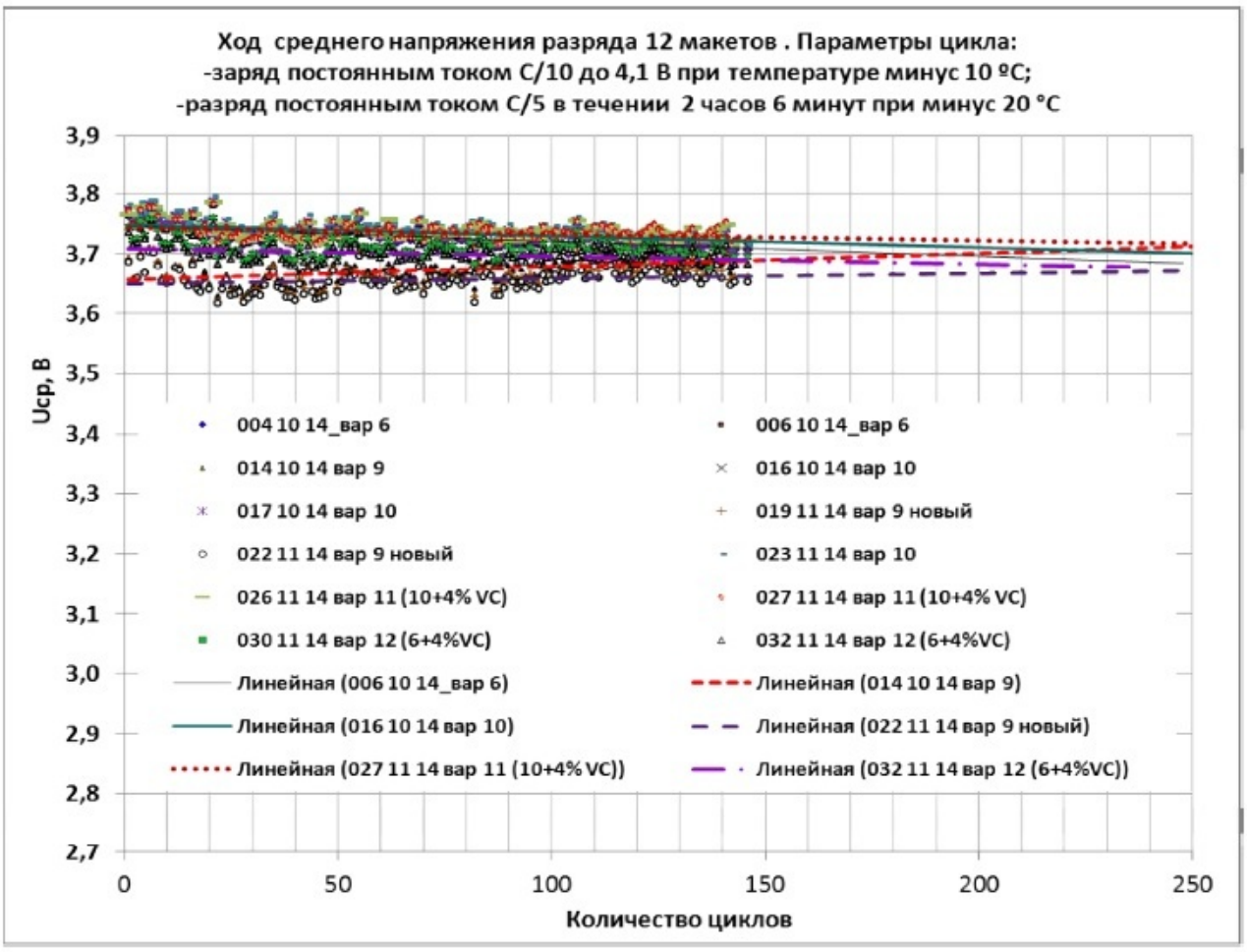


Рисунок 3 – Изменение среднего напряжения разряда на прогоночных циклах

Из представленных данных следует, что напряжение окончания разряда на протяжении 150 ПЦ для всех аккумуляторов стабильно, среднее напряжение разряда на протяжении 150 ПЦ для всех аккумуляторов варьируется около 3,7 В. Целью проведения контрольных циклов - определение запасов емкости и диагностика характеристик макетов ЛИА для оценки циклического ресурса. Контрольные циклы включали в себя циклы определения полной емкости с измерением внутреннего сопротивления при температурах плюс 20°С и минус 20°С для диагностики ресурсных характеристик макетов ЛИА (Рисунок 5, 6).

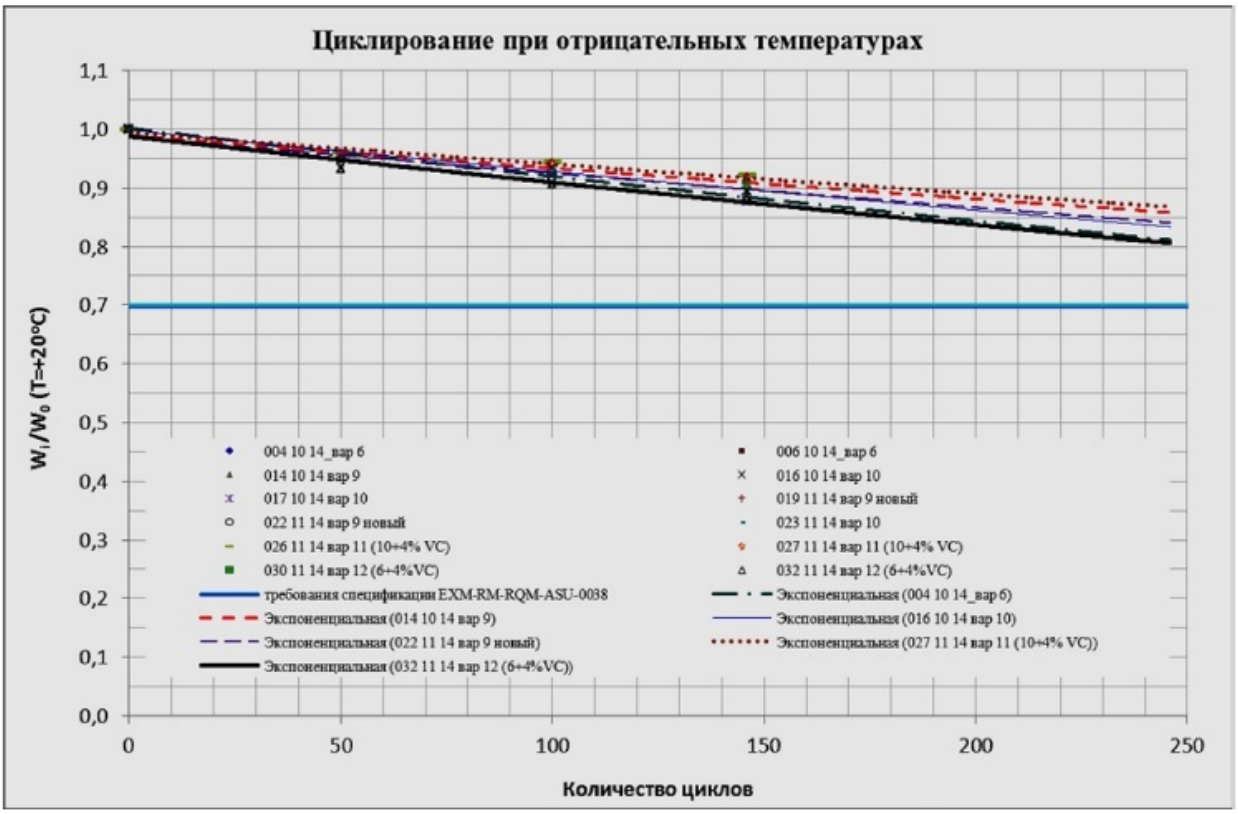


Рисунок 4 – Изменение энергоемкости ЛИА при Т=+20°С от количества прогоночных циклов при отрицательных температурах

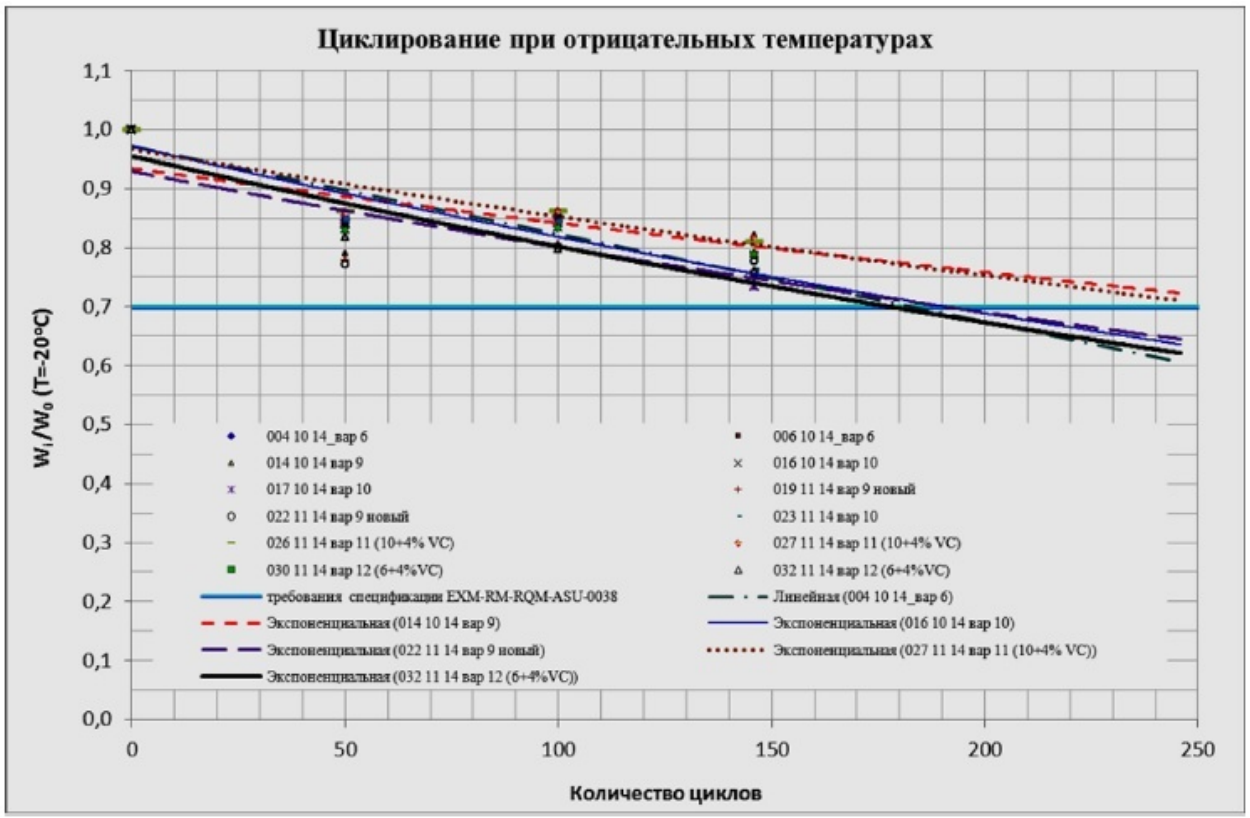


Рисунок 5 – Изменение энергоемкости ЛИА при Т=минус 20°С от количества прогоночных циклов при отрицательных температурах

Исходя из полученных данных, видно, что требования по энергоемкости с контролем характеристик ЛИА при Т=+20°С выполняются для всех макетов с запасом, а с контролем характеристик ЛИА при Т= минус 20°Свыполняются только для макетов ЛИА с вариантами электролита 9 и 11.

Таким образом, показано, что используя существующие электролиты можно расширить диапазон эксплуатации ЛИА в область отрицательных температур с вполне приемлемыми ресурсными характеристиками.

Расширение эксплуатационных характеристик литий-ионных аккумуляторов ПАО «Сатурн» в части диапазона рабочих температур создает предпосылки для решения еще одной важной задачи, а именно разработки мощностного аккумулятора ориентированного на применение в летательных аппаратах различной энерговооруженности.

Целью ставится налаживания мелкосерийного производства стартерных авиационных литий-ионных АБ с удельными характеристиками, превосходящими, применяемые в самолетах КБ Сухого, МиГ и Туполева, серебряно-цинковые и никель-кадмиевые АБ. Для реализации этих целей на предприятии ведутся проектные работы по организации участка изготовления стартерных аккумуляторов, закупки необходимого производственного и испытательного оборудования.

Согласно технического задания Объединенной авиастроительной корпорации (ОАК) к унифицированной АБ предъявляются следующие требования:

Таблица 2. Требования ОАК к унифицированной стартерной авиационной АБ

Параметры	**Единица измерения**	**Величина параметра**
1. Максимальный ток разряда (режим запуска), не менее: При времени разряда 2 с При времени разряда 10 с	А (ед. С)	 Т<=2с,1200 (27) До 10 с 450 (10)
2. Интервал рабочих температур батареи	^{0}С	Минус 60 ÷плюс 85
3. Удельная энергия (в номинальных режимах), не менее.	Вт·ч/кг	100
4 Масса, не более	кг	14
5. Срок службы по техническому состоянию	лет	10
6. Сохраняемость 90%заряда, не менее	сутки	60
7. Номинальное напряжение/ НРЦ	В	25,2/29,4
8. Ёмкость батареи в течении гарантийного периода, не менее	А·ч	45
9.Ток разряда в непрерывных режимах, не менее	А (ед С)	100 (2,2)
10. Габаритные и присоединительные размеры, не более	(ВхШхД)мм	427х120х180
11 Ресурс, не менее	цикл	400

Значения параметров технических требований в отдельных пунктах значительно превосходят соответствующие показатели существующих стартерных авиационных аккумуляторных батарей.

Так по интервалу рабочих температур наиболее совершенными оказываются серебряно-цинковые АБ имеющие рабочий диапазон эксплуатации минус 20°С – плюс 60 °С, с допустимым эксплуатационным окном от минус 50°С со значительным снижением технических параметров. Никель кадмиевые аккумуляторы имеют рабочий диапазон минус 20°С плюс 50°С с допустимым окном эксплуатации от минус 40°С до плюс 70°С. Т.е. применение выполнимого рабочего диапазона батарей от минус 40°С до плюс 50°С – будет так же означать расширение температурного диапазона. С возможностью кратковременного использования при температурах выше 50°С и ниже минус 40°С (с исключением заряда при отрицательных температурах).

Требования к удельной энергии на уровне не менее 100 Вт ч /кг выглядят так же значительно завышенными. На сегодняшний день серебряно цинковые АБ имеют 47 Втч/кг, никель кадмиевые 28

Втч/кг, значения в 90-95 Втч/кг будут значительным прогрессом.. Возможны так же проведение работ по повышению удельных характеристик аккумуляторных батарей путем подъема рабочего напряжения.

Остальные требования проработаны в рамках существующих обширного научно технического задела.

Работы по созданию мощностного аккумулятора обеспечивающего стартерные токи разряда на предприятии ведутся с 2014 года.

На рисунках 7, 8 и 9 представлены разрядные кривые аккумуляторов разряжаемые током 10С при различной температуре. Используются толщины электрода положительного в 100, 70, мкм и строится прогноз к толщине 30 мкм. При температуре плюс 20°С и минус 20°С.

Если при положительной температуре достаточно использование толщин катода 70 мкм, то при отрицательных температурах необходимо использование толщин катода менее 50 мкм, в случае использования 30 мкм катода – получаются наиболее оптимальный аккумулятор для низкотемпературных испытаний. Кроме того необходимо использования низкотемпературного электролита с точкой замерзания ниже минус 50°С.

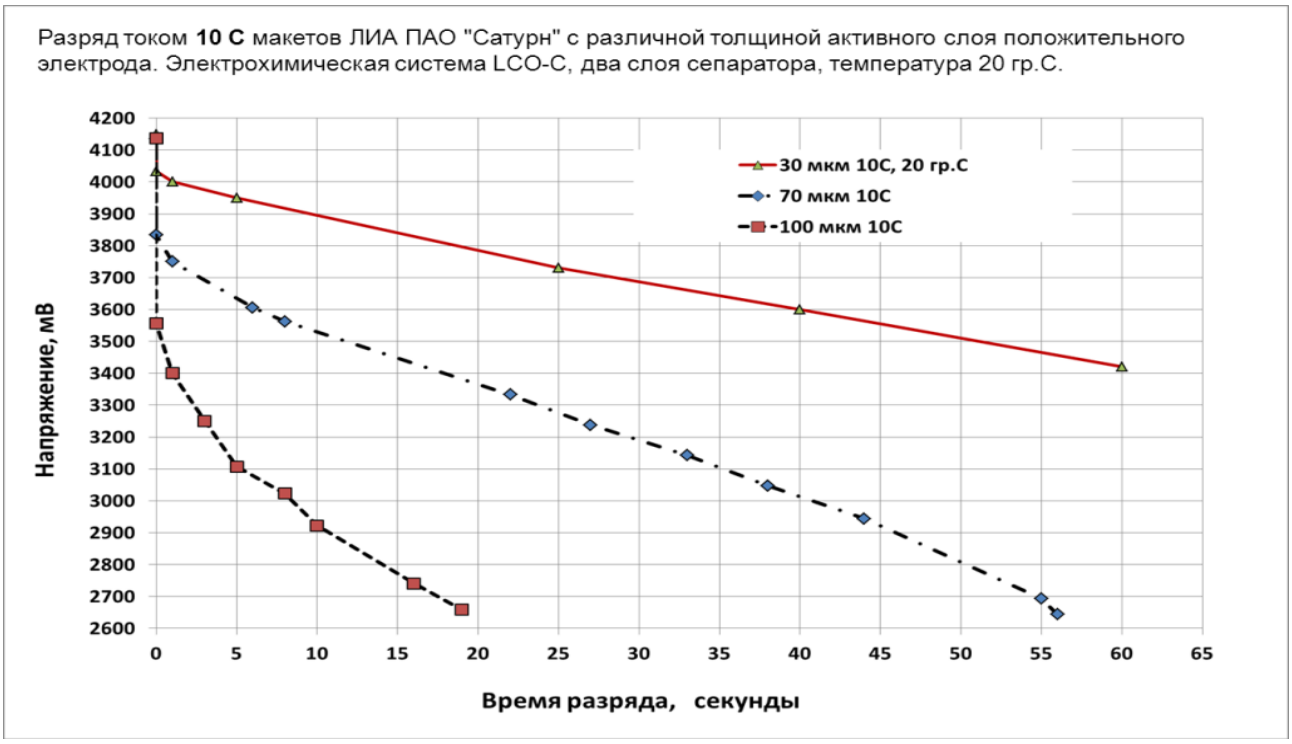


Рисунок 7 –Ход напряжения разряда макетов ЛИА ПАО «Сатурн» с различной толщиной активного слоя положительных электродов при токе разряда 10 С и температуре 20 °С

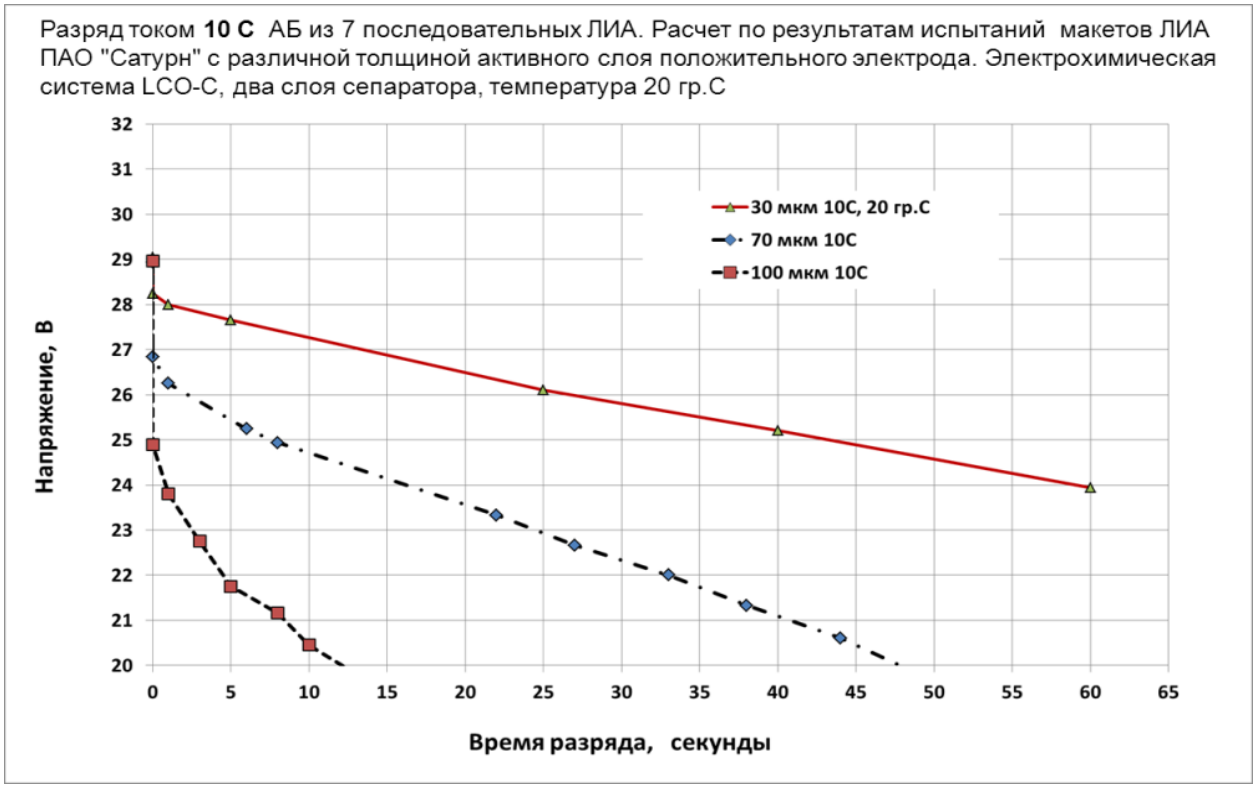


Рисунок 8 –Ход напряжения АБ из 7 последовательно соединенных ЛИА при токе разряда 10С и температуре 20 °С. Расчет по результатам испытаний макетов ЛИА с различной толщиной активного слоя положительных электродов

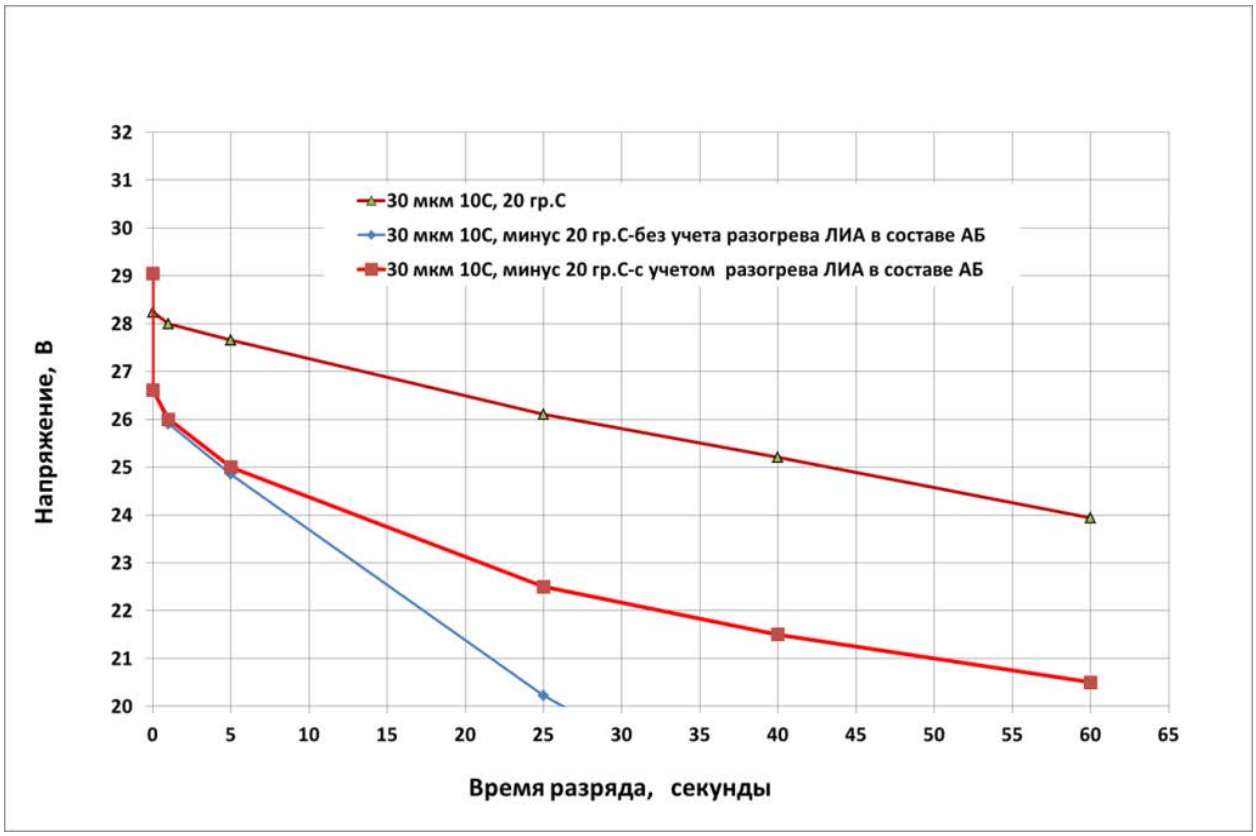


Рисунок 9 – Ход напряжения АБ из 7 последовательно соединенных ЛИА при токе разряда 10С при различных температурных условиях. Расчет по результатам испытаний макетов ЛИА с толщиной активного слоя положительных электродов 30 мкм

Ранее проведенные работы по созданию мощностного аккумулятора обозначили первую технологическую проблему: необходимость изготовления электродов (катодов) с толщинами менее 50 мкм, что на сегодняшний день невыполнимо в рамках существующей на предприятии технологии. Это и обозначило необходимость начала работ по внедрению намазной технологии.

В таблице 3 приводится сравнение проектируемой авиационной батареи и существующих аналогов.

Таблица 3. Сравнение проектируемой авиационной батареи и существующих аналогов.

Параметры	**Единица измерения**	**Литий ионная АБ 7ЛИ45СТ**	**Серебряно-цинковая 15СЦС45Б**	**Ni Cd Батарея 20KSX-27**
1. Максимальный ток разряда (режим запуска), не менее: При времени разряда 2 с При времени разряда 10 с	А (ед С)	 Т<=2с,1200 (27) До 10 с 450 (10)	 Т<=2с,1200 (27) До 10 с 450 (10)	 Т<=2с, 750 (19) До 10 с 150 (3,7)
2. Интервал рабочих температур батареи	^{0}С	-40/+50	-30/+50	+5/+50
3. Удельная энергия (в номинальных режимах), не менее.	Вт·ч/кг	90	47	28
4 Масса, не более	кг	14	23	23
5. Срок службы по техническому состоянию	лет	10	6	6
6. Сохраняемость 90%заряда, не менее	сутки	60	90	90
7. Номинальное напряжение/ НРЦ	В	25,2/29,4	24	24
8. Ёмкость батареи в течении гарантийного периода, не менее	А·ч	45	45	27
9.Ток разряда в непрерывных режимах, не менее	А (ед С)	100 (2,2)	240 (10)	240(10)
10. Габаритные и присоединительные размеры, не более	(ВхШхД)мм	427х120х180	430х134,5х227	433х134х182
11 Ресурс, не менее	цикл	1000	100	250

Как видно – литий-ионная батарея значительно опережает существующие АБ по температурному диапазону эксплуатации, удельной энергии, сроку службы. Имеет более низкие токи разряда (в случае изменение ТЗ возможно и их поднятие), при сопоставимой цене, имеет наименьшую стоимость пуска.

Выводы

1. На предприятии имеется научно-технический задел позволяющий обеспечить проведение работ по разработке, изготовлению и квалификации литий-ионных аккумуляторов с удельной энергией более 200 Втч/кг.

2. Работы, направленные на расширение температурного диапазона эксплуатации ЛИА и АБ на их основе позволят увеличить потенциальную область их применения в робототехнических комплексах, приборах специального назначения, средствах связи и т.п.

3. Создание мощностного аккумулятора позволит не только обеспечить реализацию требований ТЗ ОАК по созданию унифицированной стартерной авиационной АБ, но и проводить модернизацию уже имеющегося парка авиатехники осуществляя замену серебряно-цинковых и никель-кадмиевых АБ на более эффективные литий-ионные. Решения, принятые при реализации этого проекта должны найти

применение и в беспилотных летательных аппаратах (дронах), разработка которых ведется в большинстве случаев с ориентацией на зарубежных производителей источников питания.

4. В докладе показана принципиальная возможность реализации указанных целей. По положительным результатам отработки конструкторско-технологических решений работы будут продолжены в части подтверждения циклического ресурса и сохраняемости ЛИА.

1. Da Deng. Li-ion batteries: basics, progress, and challenges // Energy Science & Engi-neering. – 2015. – Vol. 3, No. 5. – P. 385–418.
2. Menictas C., Skyllas-Kazacos M., Mariana L. T. Advances in Batteries for Medium and Large-Scale Energy Storage. – 2015. – part 6. – P.125-211.
3. С.Д. Лихоносов, В.А. Попов, В.П. Кулыга, А.В. Пачуев. «Перспективные системы и задачи управления»: материалы Одиннадцатой Всероссийской научно-практической конференции и Седьмой молодежной школы-семинара «Управление и обработка информации в технических системах»; Южный федеральный университет. – Ростов-на-Дону: Издательство Южного федерального университета, Т. 2. – 2016. – 376 с. С. 49-63.
4. Результаты научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ ПАО «Сатурн».
5. C. Baur et al, Analysis of the radiation hardness of triple- and quintuple-junction solar cells, 31st IEEE Photovoltaic Specialist Conference (PVSC) 2005.
6. P. Patel et al, Initial results of the monolithically grown six-junction inverted metamorphic multi-junction solar cell, 38th IEEE Photovoltaic Specialist Conference (PVSC) 2012.
7. Cornfeld et al, Evolution of a 2.05eV AlGaInP top sub-cell for 5 and 6J-IMM applications, 38th IEEE Photovoltaic Specialist Conference (PVSC) 2012.

D.A. Kapustin[1], D.M. Korolev[1], O.A. Shmakov[2], A.V. Lopota[1,2]

POWER SUPPLY AND CONTROL SYSTEMS DESIGN FOR MOBILE ROBOTIC PLATFORMS

[1]SPbPU, [2] Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics, Saint-Petersburg
d.kapustin@rtc.ru, d.korolev@rtc.ru, shmakov@rtc.ru, alopota@rtc.ru

Abstract

The architecture of the mobile robotic complex is described. Technical characteristics of the mobile robotic platform are presented. The functional purpose and role of each module in the system is revealed. Structural diagrams of the complex are given, and the algorithm of the system operation is described. An important role in ensuring the survivability and trouble-free operation of the mobile robot is played by the chosen architecture of the power supply system of the robot. A set of sensors is listed that allows you to obtain information about the status of vital services and robot systems. The architecture of the control system allowing to realize emergency robot behavior protocols is presented, as well as to prevent a number of emergency situations that lead to damage or failure of the mobile robotic platform.

Key words: mobile platform, robot, control system, power supply system, architecture, electric motor, motor control driver, autonomous source, controller, control unit.

Д.А. Капустин[1], Д.М. Королев[1], О.А. Шмаков[2], А.В. Лопота[1,2]

РАЗРАБОТКА АРХИТЕКТУРЫ СИСТЕМЫ ПИТАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНОЙ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ ПЛАТФОРМЫ

[1]СПбПУ, [2]ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург
d.kapustin@rtc.ru, d.korolev@rtc.ru, shmakov@rtc.ru, alopota@rtc.ru

Аннотация

Статья посвящена описанию архитектуры мобильного робототехнического комплекса (МРК). Представлены технические характеристики МРК, раскрыто функциональное назначение и роль каждого модуля в системе. Приведены структурные схемы комплекса, и описан алгоритм работы системы. Важную роль в обеспечении живучести и безотказности работы мобильного робота играет выбранная архитектура системы питания, – перечислен набор датчиков, позволяющих получить информацию о состоянии жизненно важных служб и систем робота. Представлена архитектура системы управления, позволяющая реализовать экстренные протоколы поведения робота, а также предотвратить ряд аварийных ситуаций, влекущих за собой повреждение или выход из строя МРК.

Ключевые слова: мобильная платформа, робот, система управления, система питания, архитектура, электродвигатель, драйвер, автономный источник, контроллер, пульт управления.

Введение

По мере роста технического развития перед научным и инженерным сообществом все чаще стоит вопрос, как сделать устройство, которое, заменяя человека, выполняло бы ряд необходимых задач или по крайней мере позволило бы уменьшить в них степень участия человека. Данная проблема особенно актуальна в сферах применения, связанных с риском для человека. Например, при ликвидации последствий техногенных катастроф или несчастных случаев, при проведении операций в местах военных действий, в ходе работы в опасной для человека среде на производственных участках и т.д. Во всех отмеченных случаях существует угроза жизни и здоровью человека. Однако в настоящее время «замена» человека связана с рядом проблем, которые невозможно решить единовременно. Первая и ключевая трудность заключается в необходимости принятия осознанных решений для достижения поставленной задачи. Человек способен воспринимать и анализировать огромный поток разнородной информации, и на сегодняшний день не представляется возможным создать универсальное техническое решение, которое бы по своей производительности не уступало ему. Человек способен одновременно обрабатывать визуальную информацию, распознавать звуки, ощущать температуру и влажность, обладает осязанием, что в совокупности позволяет ему

воспринимать внешние воздействующие факторы и анализировать их. Кроме того, человек обладает рядом моторных навыков, позволяющих координировать действия и движения, благодаря которым он способен перемещаться в различных условиях (бег, плавание и т.п.). Поскольку создание робота, который обладал бы аналогичными человеку возможностями по перемещению, затруднительно, при разработке роботов, как правило, ограничиваются одной конкретной средой функционирования. Роботы разделяются на наземные, водоплавающие (надводные и/или подводные) и летающие [1]. Для ликвидации последствий техногенных катастроф и последствий несчастных случаев зачастую достаточно, чтобы робот осуществлял перемещение по земле. В данной статье рассмотрено устройство наземного мобильного робототехнического комплекса (МРК) «Капитан», описано функциональное назначение его основных узлов, а также приведена структурная схема комплекса.

Архитектура системы

Любое техническое устройство в первую очередь представляет собой систему связанных функциональных узлов, обеспечивающих в совокупности выполнение задачи, возложенной на систему. Рассмотрим основные функциональные узлы, которые встречаются в каждом робототехническом комплексе с цифровой системой управления вне зависимости от его назначения и габаритов. Современная концепция разработки систем управления построена на применении цифровых микросхем – микроконтроллеров. Микроконтроллер представляет собой маломощный центральный вычислитель для каждого из функциональных блоков [2]. Схема МРК в целом представлена на рис. 1.

Вычислительное устройство

Как правило, функцию обработки любой информации в технике выполняют вычислительные устройства (ВУ) – компьютеры. Задача ВУ заключается в частичной замене человека в вопросе обработки полученной информации и принятии решения о дальнейших действиях. ВУ хранит в своем запоминающем устройстве (ЗУ) программу, в которой реализованы написанные человеком алгоритмы обработки информации. Сбор информации осуществляется системой датчиков различных типов, в зависимости от типа требуемой информации. Стандартный набор позволяющих получить нужную информацию датчиков состоит из: датчиков температуры, давления, влажности, датчиков газа (датчиков наличия химических элементов в окружающей среде), а также различных устройств для определения расстояния до объектов и средств получения визуальной информации. Все вышеперечисленное можно выделить в единую систему, которая называется информационно управляющая система (ИУС). ИУС в свою очередь, в отрыве от технической реализации, можно разделить на подсистемы: систему датчиков и вычислительный комплекс. ИУС получает информацию со всех доступных источников и осуществляет действия в соответствии с заложенным в ЗУ ВУ алгоритмом. В общем случае ИУС отправляет команды на те или иные управляющие узлы, которые выполняют требуемую команду.

Система питания

На моменте технической реализации МРК появляется еще ряд систем, обеспечивающих функционирование устройства. Самая важная и сложная для реализации – система обеспечения питания (СП). СП обеспечивает систему в целом необходимым набором питающих напряжений, удовлетворяющих требованиям качества и мощности, которые предъявляются производителями необходимых для построения системы электронных устройств. В простейшем случае это может быть самый обыкновенный аккумулятор или промышленная сеть предприятия. Кроме того, СП выполняет ряд смежных функций. Несмотря на кажущуюся необязательность, реализация этих дополнительных функций позволяет обеспечить значительно лучшие эксплуатационные характеристики системы. К таким функциям можно отнести, в случае батарейного питания системы, – контроль заряда аккумуляторной батареи, контроль токов потребления по всем шинам питания, обеспечение процесса зарядки аккумуляторной батареи, обеспечение контроля за состоянием аккумулятора и оповещение о его деградации и т.д.

Система приводов

В ходе выполнения большинства операций человек перемещается в пространстве, а также выполняет сложные манипуляционные действия с объектами окружающей среды. Примером таких манипуляций могут быть: устранение завалов, открытие и закрытие дверей, помещение различных

объектов в емкости и извлечение из них и т.д. Для того, чтобы реализовать выполнение данных операций, требуются специальные узлы, позволяющие управлять приводными устройствами. Как правило, для наземных робототехнических платформ сверхлегкого класса в качестве приводного узла применяется электропривод.

Управление электроприводом осуществляется с помощью специального преобразователя напряжения – драйвера двигателя (ДД). Чаще всего ДД представляет собой частотный преобразователь, который с помощью сигналов обратной связи (ОС) по току, положению или скорости, исходя из поступающей команды от ИУС, вычисляет управляющее воздействие и передает его на привод (двигатель). В зависимости от типа применяемого электропривода ДД значительно различаются в стоимости и сложности изготовления.

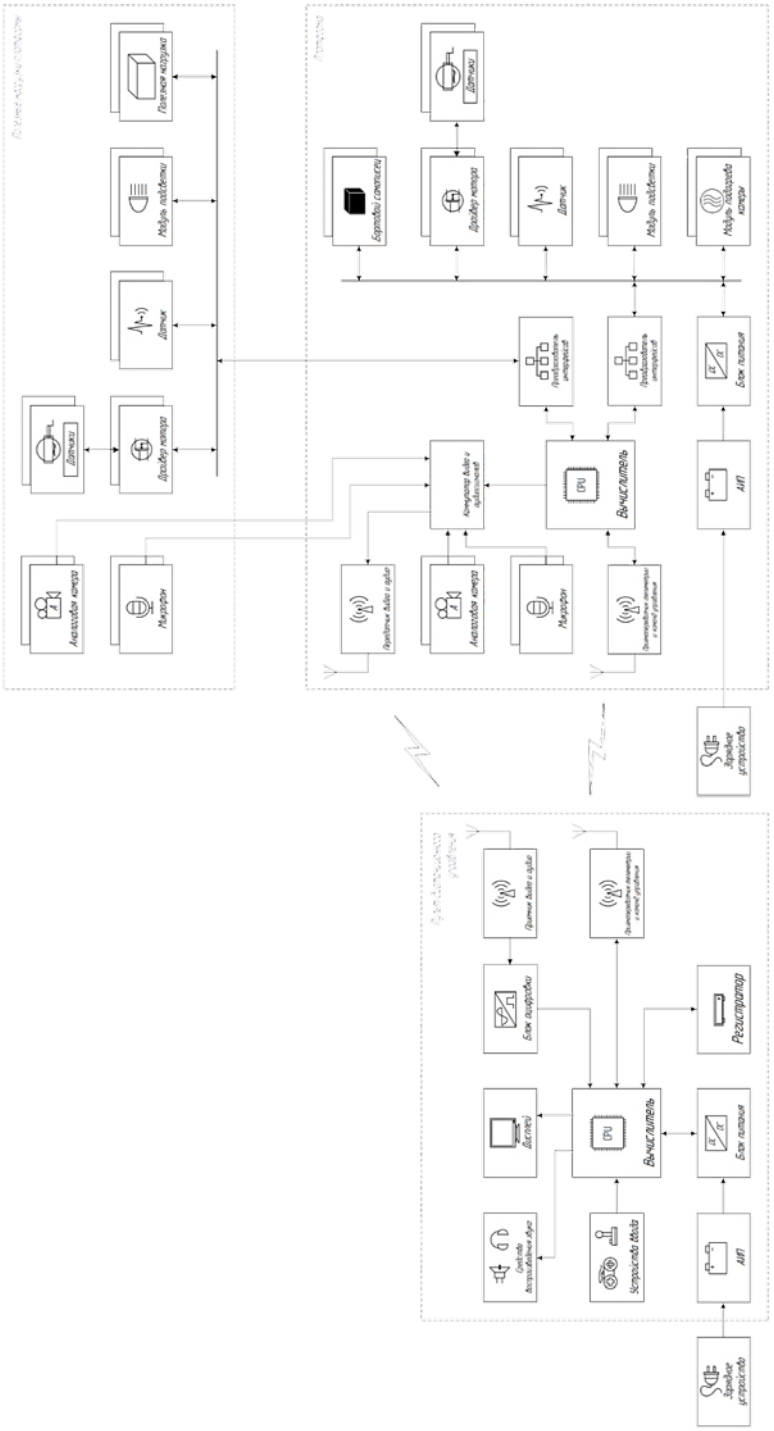


Рисунок 1 – Структурная схема МРК «Капитан»

Как правило, для мобильных робототехнических платформ (если позволяют габариты устройства) используются бесколлекторные двигатели постоянного тока, которые требуют более сложной реализации драйверов и специальных алгоритмов управления.

Электропривод применяется в качестве устройства, приводящего в движение различные механизмы платформы такие, как система движителей, опорно-поворотные устройства, шарниры манипулятора, рычаги для создания дополнительной опоры и т.д.

Канал связи

Следующей задачей, которую необходимо решить, является передача данных на удаленное от рабочей зоны расстояние, для обеспечения безопасности жизни человека и создания эффекта присутствия. В настоящее время для управления устройством или наблюдением за ним на большом расстоянии от местоположения оператора применяются два способа построения канала связи (КС) – с помощью передачи данных по кабельной сети или по радиоканалу [3]. В большинстве случаев используется способ управления по радиоканалу, поскольку он обеспечивает наибольшую дальность управления. Преимуществом управления по радиоканалу является не только дальность передачи данных, но и отсутствие как таковой кабельной линии, которую можно было бы повредить, нарушив тем самым процесс передачи данных. К недостаткам данного способа можно отнести сложность технической реализации, высокую стоимость, а также необходимость специальных мер для предотвращения перехвата или «заглушения» полезного сигнала. Как и любой функциональной узел, КС необходимо обеспечивать соответствующим питающим напряжением (согласно требованиям завода изготовителя). Кроме того, поскольку КС является источником помех внутри робота, в системе питания следует предусмотреть возможность предотвращения распространения помех в другие системы робота. Стоит отметить, что применение беспроводного (радио) КС сопряжено с определенными трудностями в ходе компоновки узлов робота, вызванными предъявляемыми требованиями к расположению антенн приемо-передающих устройств на корпусе или внутри корпуса робота.

Как правило, используется радиосвязь на частотах 433 МГц, 868 МГц, 2,4 ГГц (Wi-Fi) или 5 ГГц (Wi-Fi) [4]. Однако список используемых частот не ограничивается упомянутыми и зависит во многом от поставленных задач, т.к. при разработке собственного приемо-передающего устройства возможно задать любую подходящую для передачи данных частоту, если это целесообразно.

Технологические устройства

Для облегчения взаимодействия с системой, в процессе наладки в ней должны быть предусмотрены специальные интерфейсы и программные средства, позволяющие проследить за пробной эксплуатацией устройства. Для печатной платы это отладочный интерфейс микроконтроллера, который позволяет анализировать процесс выполнения программы и выявить ошибки.

Чтобы осуществлять отладку всей системы в целом, необходимо концептуально предусмотреть специальное программное обеспечение, позволяющее получить доступ к технологической информации, которая может храниться непосредственно в ЗУ, расположенных в каждом из функциональных блоков каждой подсистемы.

В процессе опытной эксплуатации требуется наличие бортового эксплуатационного регистратора (БЭР). Данное устройство предназначено для ведения журнала событий, сбора статистики и информации о корректной эксплуатации изделия. Информация такого рода носит исследовательский характер и необходима для отработки возможных случаев отказа или для дальнейшей модернизации системы. БЭР «слушает» шину данных, которая связывает функциональные блоки, и ведет журнал событий, сохраняя его на внешнем носителе.

Пульт управления

Пульт управления предназначен для обеспечения связи с платформой МРК, приема информации с платформы, обработки ее и предоставления оператору в удобной для восприятия форме. Пульт включает в себя автономный источник питания, вычислитель, приемо-передатчики и оснащен устройствами ввода-вывода информации для управления платформой. Например, посредством пульта управления обеспечивается вывод информации о показаниях дальномеров, состоянии батареи и происходит визуализация ряда параметров, таких как текущий крен платформы, положение рычагов,

скорость передвижения, радиус выполняемого поворота и т.д. Структурная схема пульта управления приведена на рис. 2.

Предлагаемое техническое решение

С учетом вышеизложенного в ЦНИИ РТК разработан и изготовлен наземный МРК «Капитан» – платформа на базе гусеничного шасси, оснащенная дополнительными устройствами (рычагами), которые позволяют существенно повысить проходимость платформы. Данный МРК относится к классу сверхлегких специальных инженерных роботов [5].

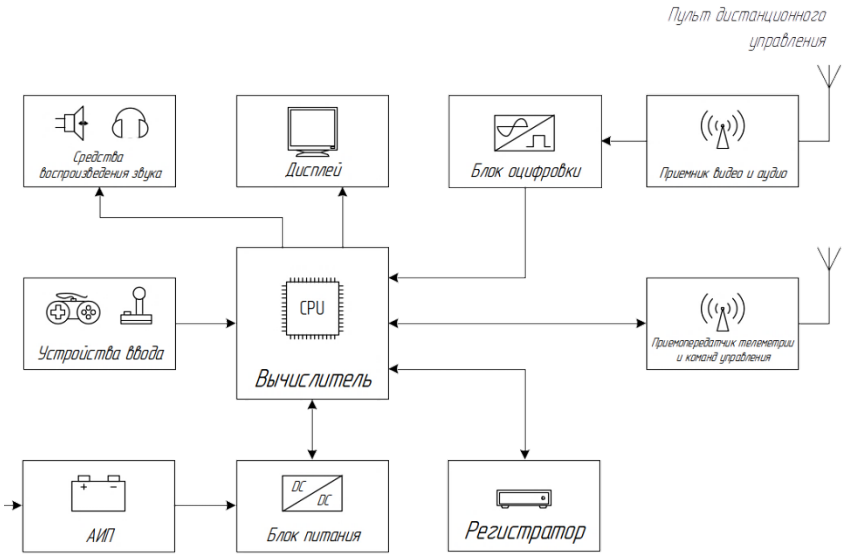


Рисунок 2 – Структурная схема пульта управления

МРК «Капитан» оснащен видеокамерами кругового и курсового обзора, двумя ультразвуковыми дальномерами, двумя блоками осветителей и многооборотным корневым шарниром для подключения полезных нагрузок. Подробные технические характеристики платформы представлены в табл. 1.

Таблица 1. Технические характеристики платформы МРК «Капитан»

Параметр	**Значение**
Габаритные размеры (Д х Ш х В), мм	620 х 465 х 215
Масса, кг	35
Грузоподъемность, кг	20
Скорость передвижения, м/с	до 1,5
Преодоление препятствий: – травяной покров высотой до, м – снежный покров глубиной до, м	 – 0,3 – 0,1
Преодоление препятствий: – уклоны до, ° – уступы высотой до, м – щели шириной до, м	 – 30 – 0,2 – 0,3
Время автономной работы: – в режиме движения, ч – в режиме наблюдения, ч	 – 3 – 6
Дальность управления по радиоканалу: – открытая местность, м – в условиях городской застройки, м	 – 900 – 500

Дальность управления по кабельной линии (оптоволокно), м	300
Диапазон рабочих температур, °С	-30 … +50
Оснащение платформы	курсовая видеокамера – 1шт. кормовая видеокамеры – 1шт. ультразвуковой дальномер – 2шт. блок осветителей – 2шт. корневой шарнир – 1шт.

Структурная схема

На рис. 3 представлена структурная схема платформы МРК «Капитан».

Вычислитель или центральная плата управления (ЦПУ) – головное устройство, содержащее в себе алгоритмы функционирования робота и являющееся ведущим для всех шин данных. Функцию центрального вычислителя в составе ЦПУ выполняет производительный микроконтроллер. Центральный вычислитель обеспечивает координацию всех устройств платформы и отвечает за логику работы устройства. Он имеет доступ к информации о текущем состоянии робота и отвечает за выполнение всех протоколов, предписанных программой в определенных ситуациях. К таким протоколам, например, относится протокол поведения робота в аварийной ситуации, определяющий объем информации, который должен быть передан оператору, и функции, которые должны или могут быть отключены для сохранения минимальной необходимой работоспособности робота, а также включение аварийных режимов работы устройства. В случае проблем с автономным источником питания, приемо-передатчики, как модули с наибольшим потреблением питания, могут быть переведены в режим низкого потребления. Другим примером может служить ограничение потребляемой мощности драйверов двигателей. В такой ситуации станет недоступным перемещение робота на номинальной скорости или перемещение грузов с помощью манипулятора меньшего веса.

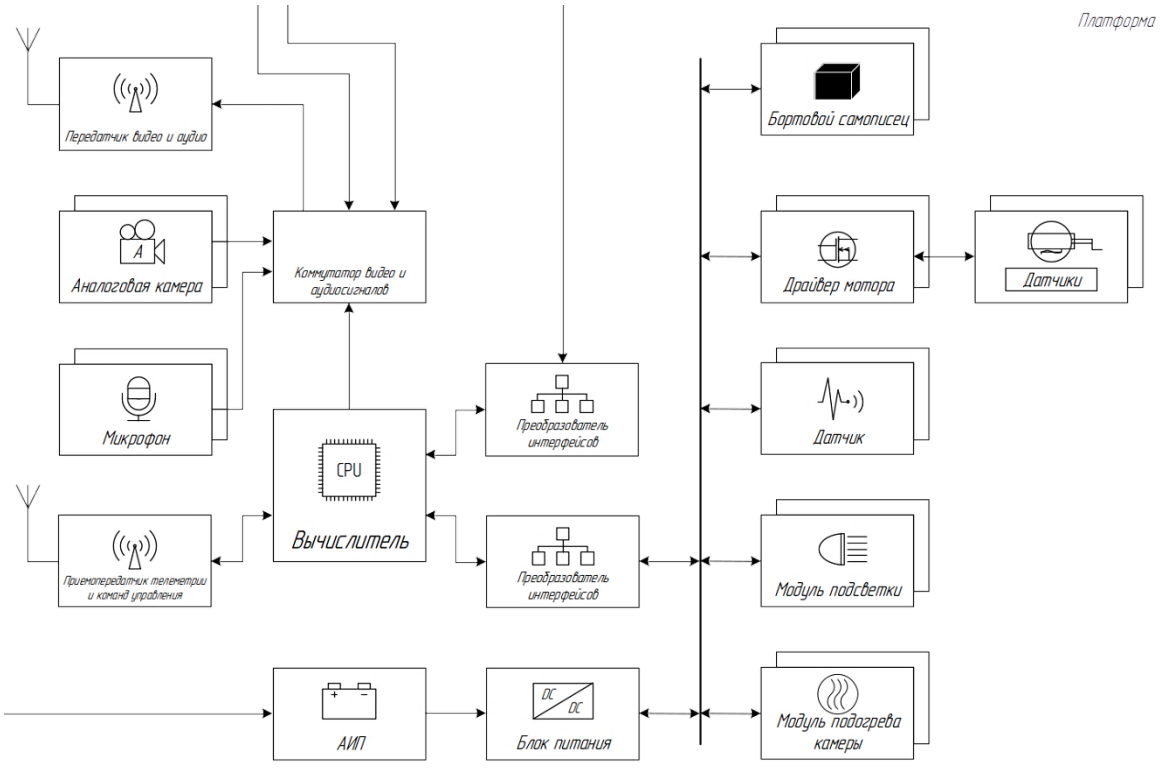


Рисунок 3 – Структурная схема платформы МРК «Капитан»

Модуль автономного источника питания (АИП) – устройство, которое обеспечивает контроль за всей системой питания. В данном блоке реализовано наблюдение за уровнем заряда аккумулятора и его техническим состоянием, управление процедурой включения и выключения платформы, а также

подключение и отключение устройств к шинам питания. По каждой шине осуществляется контроль потребляемого тока. В зависимости от потребления мощности можно судить о состоянии «абонента», подключенного к шине. Кроме того, информация о потребляемом токе позволяет систематизировать данные о режимах эксплуатации робота и оценивать корректность применения комплекса в целом. В дальнейшем эта информация может использоваться для модернизации МРК или поиска возможных проблем. Модуль автономного источника питания так же, как и все прочие устройства, подключен к шине данных и по запросу выдает информацию центральной плате.

Драйвер мотора – группа устройств, отвечающих за перемещение подвижных узлов. К данной группе в случае платформы МРК «Капитан» относятся электродвигатели, а также устройства управления ими – драйверы двигателей. При этом все устройства так же подключены к шине данных. Драйверы двигателей принимают команды центральной платы и с помощью датчиков обратной связи осуществляют управление подключенными к ним электродвигателями. Контроллер, который установлен в драйвер двигателя, содержит в себе алгоритмы управления электродвигателем и способен диагностировать его неполадку.

Датчики – общее название устройств, предназначенных для сбора различной информации о состоянии робота и окружающей среде. В платформе МРК «Капитан» использованы датчики нескольких типов.

Датчики положения (ДП) – группа устройств, предназначенных для определения положения подвижных частей робота относительно друг друга и для передачи информации о положении на управляющее устройство. Датчики положения применяются, например, для определения положения вала двигателя и измерения скорости вращения вала двигателя.

Датчики температуры (ДТ) –группа устройств, отвечающих за контроль температуры и передачу соответствующей информации на центральную плату или любой другой узел, к которому они подключены. Датчики температуры присутствуют в нескольких исполнениях. Часть из них подключается напрямую к устройствам, например, к драйверам двигателя и обмениваются информацией с ними. Другая часть представляет собой устройства, интегрированные в печатные платы, или самостоятельные устройствами в шине. Датчики температуры используются для обеспечения контроля за тепловым режимом работы устройств, а также для сбора информации об окружающей среде. Простейший пример использования – контроль за температурным режимом электродвигателя и диагностика его перегрузки.

Датчики расстояния (дальномеры) – группа устройств, которые предоставляют доступ к информации о расстоянии до объектов, расположенных рядом с платформой. Данные с дальномеров поступают на плату, на которой расположен контроллер.

Модули подсветки (МП) – группа устройств, необходимых для подсветки рабочей зоны в условиях плохой видимости. Осветители являются самостоятельными устройствами в шине, которые принимают команды с центральной платы. Каждый осветитель содержит непосредственно сам элемент освещения, а также контроллер и схему управления осветителем, которая обеспечивает необходимое питание и контроль параметров состояния осветителя.

Модуль индикации заряда – устройство, обеспечивающее вывод информации о состоянии аккумулятора на индикатор, расположенный на корпусе платформы.

Видеокамеры – устройства, предназначенные для получения видеоинформации, которая отправляется оператору на пульт управления. По изображению с видеокамеры оператор осуществляет управление платформой. Для эффективного и эргономичного управления роботом на изображение с видеокамеры на пульте управления накладывается дополнительная оперативная информация. Непосредственно видеокамера расположена внутри платформы и защищена специальным кожухом, который предотвращает возможное повреждение объектива.

Модули подогрева видеокамер – устройства, предназначенные для создания и поддержания необходимого микроклимата в месте установки камеры. Основная задача модулей подогрева заключается в предотвращении запотевания защитного стекла модуля видеокамеры.

Приемо-передатчики – группа устройств, предназначенных для обеспечения обмена информацией по радиоканалу. Платформа оборудована несколькими типами приемников и передатчиков в зависимости от назначения: передатчик «Кордон» (ф. СЕТ-1, Россия) используется для передачи изображения с видеокамер в пункт управления роботом; приемо-передатчик «Луч» (ф. СЕТ-1, Россия) обеспечивает прием информации с пульта управления и передачу информации обратно с

платформы на пульт. Приемо-передатчики принимают информацию и передают ее непосредственно на центральную плату управления.

Оптоволоконный модуль – устройство, предназначенное для обеспечения проводной связи через оптоволоконную линию.

Полезная нагрузка – группа устройств, представляющая собой отдельную систему, которая с помощью специального разъема стыкуется с системой платформы. Полезная нагрузка осуществляет обмен данными с центральной платой управления и получает питание от бортового источника питания платформы. В качестве полезной нагрузки может выступать манипулятор или радар, специальный модуль тепловизора, рентгеновский излучатель или любой другой модуль, который позволяет расширить функциональные возможности комплекса. Структурная схема полезной нагрузки представлена на рис. 4.

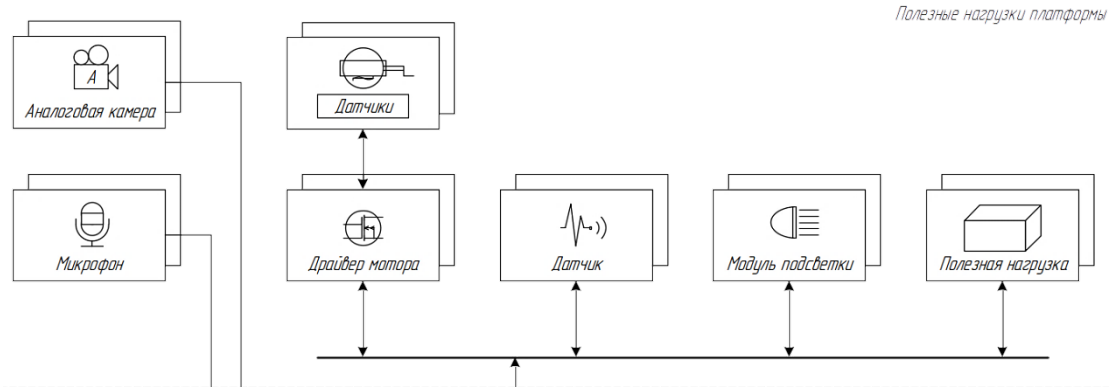


Рисунок 4 – Структурная схема полезной нагрузки платформы МРК «Капитан»

1. Юревич, Е.И. Основы робооттехники. [Электронный ресурс] / Электронная библиотека СПбПУ. Режим доступа: http://elib.spbstu.ru/dl/325.pdf (Дата обращения: 10.04.2018).
2. Лукинов, А.П. Проектирование мехатронных и робототехнических устройств: учебное пособие. – Спб.: «Лань». 2012. – 608 с.
3. Сарен, А.А. Учебник по информатике для специальностей ФТФ «Физика» и «Физическая электроника» (1 курс) [Электронный ресурс] / Кафедра физики твердого тела Петрозаводского Государственного Университета. Режим доступа: http://dssp.petrsu.ru/p/tutorial/informatics/ chapter4/9/4.htm (Дата обращения 05.04.2018).
4. Петров, Д. Стандарты беспроводной связи диапазона ISM. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.russianelectronics.ru/leader-r/review/2187/doc/53409/ (Дата обращения: 10.04.2018).
5. Васильев, А.В., Лопота А.В., Уточнение типоразмерных групп наземных дистанционно управляемых машин для применения в условиях опасных для человека // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. – 2015. – № 1 (214). – С. 226-234.

V.G. Antcev

APPLICATION OF UNMANNED ROBOT-BASEDAERIAL SYSTEMS DEVELOPED BY RADAR MMS COMPANY TO SOLVE GEOPHYSICAL, LOGISTICAL AND ENVIRONMENTAL TASKS

RADAR mms Company, Saint-Petersburg
Ancev_vg@radadr-mms.com

В.Г. Анцев

ПРИМЕНЕНИЕ РОБОТИЗИРОВАННЫХ БЕСПИЛОТНЫХ АВИАЦИОННЫХ СИСТЕМ ПРОИЗВОДСТВА АО «НПП РАДАР ММС» ДЛЯ РЕШЕНИЯ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ, ЛОГИСТИЧЕСКИХ И ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

АО «НПП «Радар ммс», Санкт-Петербург
Ancev_vg@radadr-mms.com

Аннотация

В современном мире беспилотные авиационные системы эффективно дополняют сложившуюся гражданскую авиационную индустрию. На сегодняшний день беспилотная авиационная система это не «опытный образец» беспилотного летательного аппарата, а уже система, предназначенная автоматически с большой автономностью решать специальные задачи там, где есть угроза жизни человека, где есть риск ошибки «человеческого фактора», в эпицентре аварий, в суровых климатических условиях и др.

В представленном докладе рассмотрены общие вопросы возможности использования БАС, не только для решения специальных задач, но и в интересах логистики для доставки грузов, поиска и разведки месторождений полезных ископаемых, а также с целью экологического контроля за состоянием окружающей среды.

Ключевые слова: беспилотные авиационные системы, БАС, логистика, доставка грузов, поиск и разведка, месторождения полезных ископаемых, экологический мониторинг, состояние окружающей среды.

Введение

Беспилотные технологии все больше и больше придают эффективность и с каждым днем увеличивают перечень решаемых задач, тем самым постепенно увеличивая спрос, что, в свою очередь, позволяет развивать технику и технологии в данной отрасли. Частные российские пользователи ведут воздушные съемки, инженерный мониторинг, осуществляют охрану объектов и пр. с помощью массовых БЛА мультикоптерного типа, развивая еще не легитимизованный рынок услуг. Устойчивую нишу нашел рынок беспилотной аэрокартографии для геодезии, маркшейдерии и строительной инженерии. На этапе опытно-промышленной эксплуатации находится сегмент воздушного мониторинга объектов топливно-энергетического комплекса (ТЭК) и электроэнергетики. Сегодня ряд отечественных и зарубежных компаний ТЭК осмысляют накопленный опыт и разрабатывают концепции промышленного использования БАС.

На общем мировом рынке беспилотных авиационных технологий по данным MarketsandMarkets, Teal Group (США) ключевые позиции занимают: США (65%), страны Европейского союза (6%), Израиль (3%), Китай (3%), Россия (2%). Суммарный объем рынка оценивается приблизительно в 6,7 млрд. долларов, а среднемировые темпы ежегодного роста около 8%. Из них около 66% рынка относится к сегменту военного применения, 20% - к сегменту обеспечения безопасности и только 14% - к сегменту гражданского коммерческого применения БАС. Опережающими темпами (до 15%) растут рынки Латинской Америки, Европы, Китая, Юго-восточной Азии. «Технологическими локомотивами» беспилотной индустрии являются оборонный и отчасти «игрушечный» (класса «mini») сегменты.

Номенклатура и количество беспилотных авиационных систем во всем мире непрерывно растет. Это связано с расширением спектра задач народного хозяйства, в которых применимость беспилотных

воздушных судов может быть эффективнее и экономически целесообразнее, чем традиционная пилотируемая авиация, а зачастую, в некоторых областях, могут стать альтернативой ручному труду человека.

Основополагающие сегменты в которых беспилотие будет развиваться в ближайшее десятилетие это логистика, горно-добывающая отрасль, а также экологический мониторинг инфраструктурных объектов и мониторинг окружающей среды.

Тенденции развития в отрасли

Разработка БАС первоначально носила исключительно военный характер и предполагала свое применение в военной авиации. Со временем начался процесс конверсии производства, стали более понятны сферы применения БАС в гражданских целях. Увеличилось количество разработчиков и как следствие конкуренция на рынке. Прогнозируемый объем рынка БЛА в 2014-2023 году составит 67,3 млрд. долларов по данным аналитиков компании Forecast International.

По данным ARK Invest, к 2020 году 32% БАС будут заняты в сельском хозяйстве. Другими крупными сферами применения будут являться горно-добывающая отрасль, логистика, а также экологический мониторинг инфраструктурных объектов и мониторинг окружающей среды.

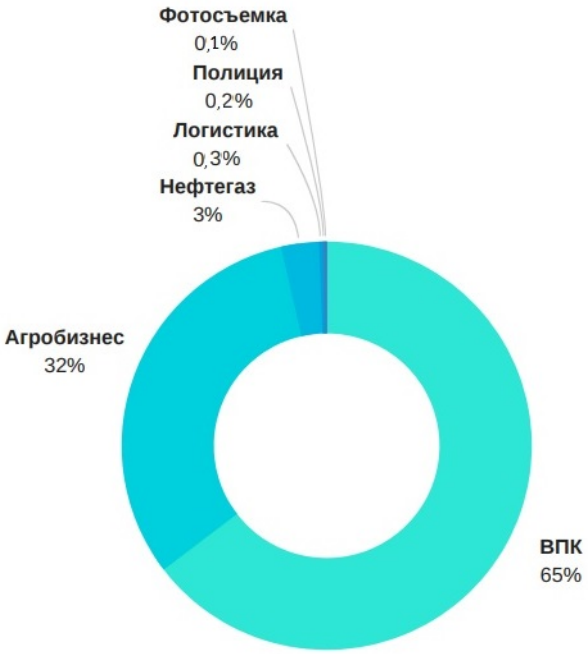


Рисунок 1 – Сферы применения БАС к 2020 году

Актуальность применения беспилотных авиационных систем в сфере логистики обусловлена необходимость осуществления адресной доставки грузов, однако в таком случае грузы должны быть относительно нетяжелыми и малогабаритными. Данная тема актуальна в отношении удаленных населенных пунктов.

Уже существуют специальные беспилотные авиационные системы, которые позволяют доставить гуманитарную помощь людям в зоны стихийных бедствий. Это одноразовые аппараты, предназначенные для сбрасывания с борта пилотируемого грузового самолета. Такие носители содержат запас пищи, воды и топлива для приготовления. Одновременно с пищей, такой беспилотный аппарат может доставить необходимые медицинские препараты.

Решения в области доставки и логистики в части применения беспилотных авиационных систем носят различный характер. Так с помощью беспилотников можно осуществить доставку как средств первой необходимости, продовольствия и медикаментов, так и доставку почты, небольших грузов и даже пиццы.

В настоящее время все промышленные отрасли используют беспилотные авиационные системы: от сельского и лесного хозяйства, до служб экстренного реагирования и правоохранительных органов, и, конечно же, в развлекательных целях. Уже сейчас ресурсная промышленность использует их для землеустройства, целевого разграничения, дистанционного зондирования земли, геофизических исследований, а также в целях наблюдения за окружающей средой.

Международная ассоциация беспилотных систем (AUVSI, США) в своем прогнозе (от 2015г.) до 2025-2030гг., пришла к выводу: экономический эффект от внедрения технологий с использованием БАС в сектор гражданских услуг может достичь $13,6 млрд только за первые три года. Использование БАС в таких областях как картографирование, мониторинг погодных условий, разведка нефтяных и рудных месторождений может принести США в период до 2025г. более $82 млрд.

На сегодняшний день одной из тенденций в части применения беспилотных авиационных систем является их модификация с целью транспортировки магнитометрического оборудования для оценки сырьевых ресурсов территорий и поиска ряда важных полезных ископаемых, из которых получают цветные и благородные металлы, алмазы и др.

В мае 2015 года Abitibi Geophysics и GEM Systems объявили о своей новой магнитометрической системе обнаружения, чем спровоцировали стойкий интерес и, как следствие, высокий уровень спроса. Их система AeroVision представляет собой беспилотный летательный аппарат с установленными на борту магнитометрами для осуществления быстрой и недорогой магнитной съемки на малых высотах. Разрешение данной съемки аналогично наземной магнитной съемке.

Аэромагнитные исследования с использованием вертолета или самолета, как правило, дешевле ввиду того, что на борту пилотируемой авиации можно расположить не только магнитометрическую систему, но и спектрометр, гравиметр и другую аппарату, что позволяет комплексировать методы поиска и получать более точные данные о разведываемой территории. Однако, в свою очередь, магнитные исследования на беспилотном носителе будут заменять трудоемкие наземные съемки. Поскольку такое обследование дешевле и требует меньших трудозатрат, а также отсутствует необходимость в нарушении земной поверхности с целью ее исследования.

Ввиду активного развития технологий, электронных компонентов, систем связи, применения новых материалов, элементов и конструкций БАС возможности использования беспилотных систем только возрастают и, в настоящее время, ведутся исследования по применению БпЛА для других видов геофизических исследований. Теоретически, любая геофизическая система может быть адаптирована к БпЛА, например спектрометр для радиометрии или EM-датчик, а также гравиметрическая аппаратура.

Определенных успехов в беспилотной магнитометрии на мировой арене добились такие компании как Abitibi Geophysics,Gem Systems,Kio Tinto.

Для проведения магнитной разведки компании применяют беспилотные воздушные суда (БВС) самолетного типа с продолжительность полета более двух часов для проведения съемок изменения магнитного поля.

В Российской Федерации к вопросу применения БАС с магнитометрическим оборудованием в интересах недропользователей подошли в 2014 году. Научными изысканиями в этой отрасли могут похвастаться компании, которые уже прошли производственную апробацию и начинают активно применять свои системы, такие как: АО «НПП «Радар ммс»; ООО «Геоинформационные системы-Сибирь»; ООО «Плаз»; Для проведения магнитной съемки компании используют беспилотные воздушные суда коптерного типа, а также вертолетного.

В этой связи спектр существующих методов и средств дистанционного зондирования Земли, начиная от различных видов пешеходной съемки и заканчивая изучением Земли из ближнего космоса ставит в повестку дня вопрос соответствия стоимости получаемых геологических результатов и затрат на их получение, т.е. цену вопроса. В истории развития беспилотной аэрогеофизики, не насчитывающей еще и четверти века своего существования вопрос, к сожалению, досконально не изучался. На первом плане были другие не менее важные аспекты: техника безопасности, организация работ, конкретные геофизические результаты.

Однако сейчас следует отметить, что рынок поиска и разведки месторождений полезных ископаемых активно развивается, это связано с тем, что уже сейчас ориентировочная стоимость одного погонного километра магнитной съемки начинается от 2 тыс. руб., а за один вылет БВС с продолжительностью полета более двух часов может покрыть площадь в 100 кв. км с шириной

профиля в 50 м, что позволяет существенно повысить эффективность и снизить издержки на проведение исследования территории.

И уже сейчас встает вопрос о дальнейших тенденциях развития беспилотной техники и специальной аппаратуры целевой нагрузки в интересах недропользователей для увеличения производительности, снижения себестоимости конечной продукции и простоты использования в труднодоступной местности.

Компетенции АО «НПП «Радар ммс»

АО «НПП «Радар ммс» является членом профессионального сообщества разработчиков и эксплуатантов беспилотных авиационных систем с 2015 года. Разработкой беспилотных авиационных систем предприятие занимается с 2008 года. За этот период был проведен большой объем научно-исследовательских, технологических и опытно-конструкторских работ в области создания беспилотных авиационных систем, бортового радиоэлектронного оборудования, систем автоматического управления движения беспилотного воздушного судна и интеллектуальных систем управления целевым оборудованием и местоположением БВС в условиях отсутствия GPS/ГЛОНАСС сигналов.

Освоен полный цикл проектирования, разработки и производства беспилотных авиационных систем, наработаны компетенции и получен большой задел в области создания для беспилотных воздушных судов бортового радиоэлектронного оборудования, систем интеллектуального управления с возможностью движения без GPS/ГЛОНАСС сигналов и обеспечения автономности полета беспилотного воздушного судна. Открытая архитектура БРЭО обеспечивает универсальность, масштабируемость и интеллектуальность системы.

На сегодняшний день АО «НПП «Радар ммс» успешно применяет беспилотные воздушные суда взлетной массы от 30кг-50кг для решения следующих задач:

Доставка грузов

Рисунок 2 – Полевые работы по беспилотной доставке груза
с помощью носителя производства АО «НПП «Радар ммс»

- впервые в нефтегазодобывающей отрасли была отработана технология беспилотной доставки грузов на промышленные объекты с применением беспилотного вертолета «Бриз» взлетной массой 37 кг. «Бриз» совершил полет на расстояние 40 км полностью в автоматическом режиме. Время в пути беспилотного вертолета «Бриз» составило 45 мин. Температура воздуха была 12°С, скорость ветра - 5м/с, в порывах до 7м/с. Оборудование, необходимое для бесперебойной работы скважины весом 4,5 кг, было доставлено по маршруту из ООО «Газпромнефть-Снабжение» (логистическая база) до нефтяного месторождения АО «Газпром-Нефть Пограничное»;

Поиск и разведка месторождений полезных ископаемых

В мае 2015 года компанией АО « НПП «Радар ммс» была проведена апробация метода поиска с использованием беспилотного воздушного судна вертолетного типа и магнитометрической системы на эталонном участке. Результатами данной работы стало сравнение данных полученных наземным методом и аэро беспилотным.

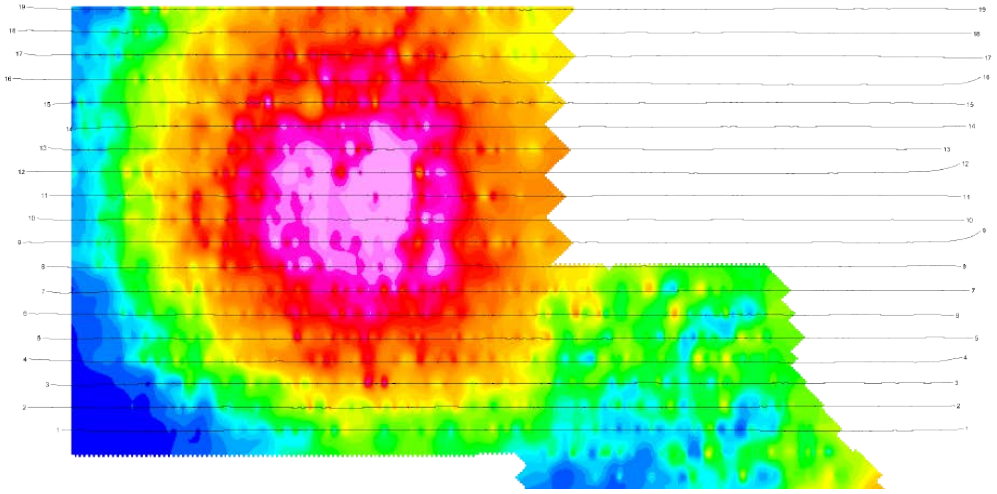


Рисунок 3 – Наземная съемка

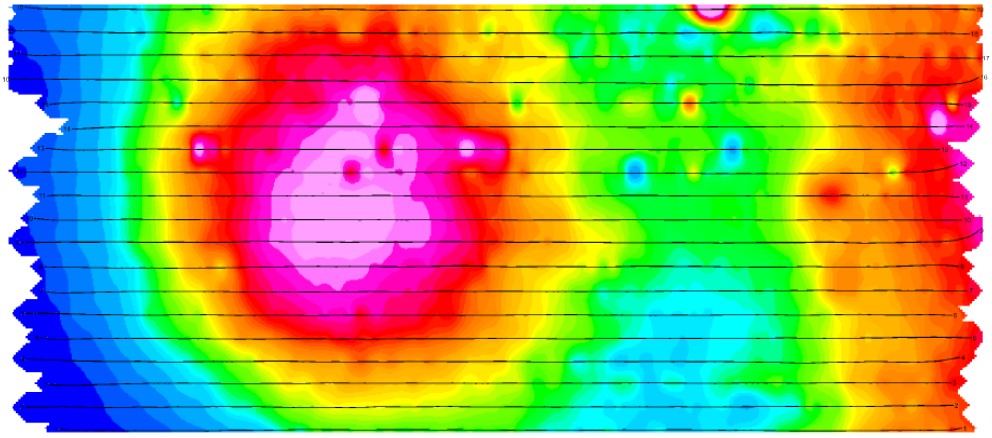


Рисунок 4 – Съемка с БВС

Из представленных результатов можно увидеть сходимость в съемки, что подтверждает его целесообразность и применимость в качестве альтернативы наземной съемки.

Экологический мониторинг инфраструктурных объектов

Преимущества и уникальность данной технологии позволяет создавать и поддерживать в актуальном состоянии информационные базы данных в режиме реального времени, что позволяет использовать БАС в качестве носителя комплекса экологического мониторинга.

Комплексный мониторинг имеет три основные цели.

Во-первых, он направлен на обеспечение контроля, за соблюдением природопользователями нормативов качества окружающей среды.

Во-вторых, позволяет прогнозировать антропогенное изменение геосистем и эффективность природоохранных мероприятий.

В-третьих, комплексный мониторинг решает задачу своевременного выявления и предупреждения необратимых процессов в изменении природных сред под воздействием хозяйственной или иной деятельности.

Основной задачей БАС является автоматизация организационных процессов, связанных учётом природных ресурсов и мониторинг экологической обстановки в регионе, в том числе:

1. учет месторождений полезных ископаемых;
2. учет водных ресурсов;
3. учет водоохранных зон;
4. учет особо охраняемых природных территорий;
5. мониторинг состояния атмосферы;
6. мониторинг состояния гидросферы;
7. отображение статистических данных на карте;
8. отображение гидрологических моделей на карте:
9. средняя толщина льда;
10. среднегодовой сток;
11. сток наносов за половодье и т.д.
12. решение аналитических задач;
13. генерация отчетности в табличном и картографическом виде.

Применение систем наблюдения с использованием беспилотных авиационных систем на нефтедобывающих предприятиях и инфраструктурных объектах позволяет повысить эффективность планирования использования природных ресурсов, упростить учет природных ресурсов и актуализацию данных по ним, а также автоматизировать мониторинг экологической обстановки.

Заключение

С развитием технологии БВС, индустрия размышляет над полезными способами их использования, чтобы повысить ценность ресурсных проектов.

Как Кард иронически заявляет: «Это в буквальном смысле лишь точка взлета».

A.G. Netkachev, D.N. Bychkovskii, A.L. Korotkov

METHODS FOR INCREASING THE PERFORMANCE OF THE MACHINE FOR LAYER-BY-LAYER CREATING OF POLYMERIC-SAND MOLDS

Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics, Saint-Petersburg
alexandrnetkachev@gmail.com, a.korotkov@rtc.ru

Abstract

Improvement of technological processes in industry leads to a wider use of additive technologies, including the emergence of the need for the use of these technologies in batch production, which imposes higher requirements on the performance of additive machine and their approximation to the performance of traditional technologies, especially for polymeric-sand molds technology making by the method of layer-by-layer synthesis. The search for ways to improve productivity will help determine the most promising areas of research in this area. At the same time, the trend is in the direction of intellectualization of control systems.

Key words: Additive technologies, sand-polymer molds, 3D printer.

А.Г. Неткачев, Д.Н. Бычковский, А.Л. Коротков

ПОИСК СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ УСТАНОВКИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ПЕСЧАНО-ПОЛИМЕРНЫХ ФОРМ МЕТОДОМ ПОСЛОЙНОГО СИНТЕЗА

ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург
alexandrnetkachev@gmail.com, a.korotkov@rtc.ru

Аннотация

Совершенствование технологических процессов в промышленности приводит к более широкому применению аддитивных технологий, в том числе к появлению потребности к использованию данных технологий в серийном производстве, что накладывает повышенные требования к производительности аддитивных установок и приближении их к производительности традиционных технологий, особенно это относится к технологии создания песчано-полимерных литейных форм методом послойного синтеза. Поиск направлений повышения производительности поможет определить наиболее перспективные области проведения исследований в этой области. При этом тенденция складывается в сторону интеллектуализации систем управления.

Ключевые слова: Аддитивные технологии, песчано-полимерные формы, литейные формы, 3D принтер, производительность.

Введение

В промышленности все большую применимость находят установки, работающие по принципу послойного синтеза (аддитивные технологии). Данный вид установок позволяет создавать геометрически сложные детали, которые невозможно или крайне сложно изготовить традиционными методами. Более глубокое внедрение установок послойного синтеза в технологическую цепочку предприятий зачастую ограничивалось высокой себестоимостью получаемых изделий и низкой производительностью установок по сравнению с другими способами производства изделий.

В последнее время повышение конкуренции на рынке установок и расходных материалов привело к значительному снижению себестоимости изделий, что совместно с накопленным опытом использования аддитивных технологий ведет к применению в серийном производстве изделий. Однако, в связи с низкой производительностью аддитивных установок, их применение в серийном производстве затруднительно. Из этого следует, что задача повышения производительности является наиболее актуальной для этой области. Особенность этой задачи состоит в необходимости повышения производительности при соблюдении технологических ограничений и требований к точности.

Установка для создания песчано-полимерных литейных форм методом послойного синтеза представляет собой мехатронный комплекс, который совмещает в себе систему управления на базе промышленных персональных компьютеров, цифровые исполнительные следящие приводы (сервоприводы) с механизмами линейного перемещения на базе зубчатых ремней и шарико-винтовых

пар (ШВП), опускающуюся платформу, устройство нанесения песчаного слоя и рабочий орган (пьезоэлектрическая печатающая головка) с программно управляемыми пъезоэлементами, синергетически объединенными в соответствии с принципами мехатроники и отличающиеся высокой степенью автоматизации технологического процесса.

Алгоритм работы установки упрощенно состоит из следующих основных технологических операций (см. рис. 1), повторяемых циклически до окончания построения:

1. нанесение песчаного слоя;
2. опускание платформы;
3. внесение отверждающего состава (связующего) в песчаный слой.

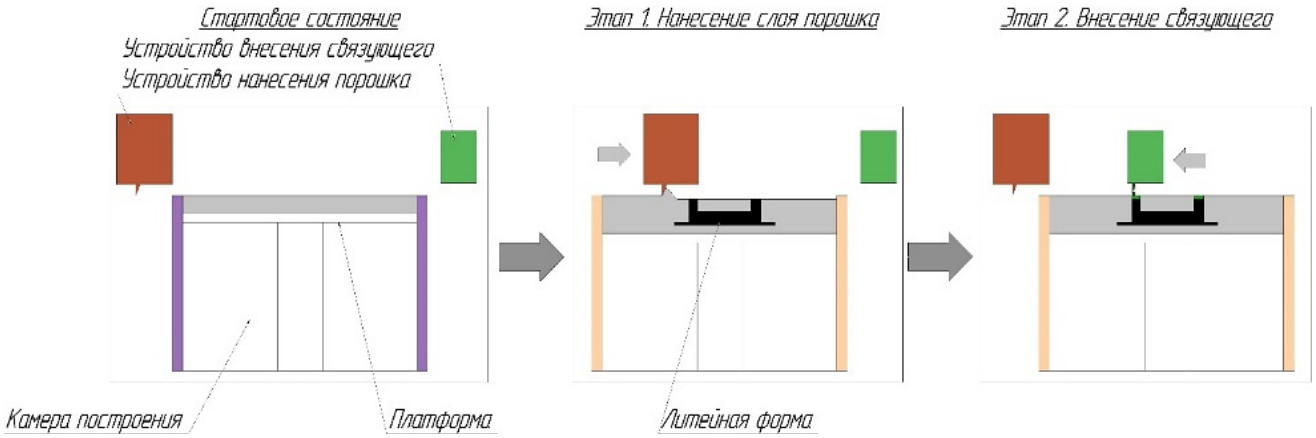


Рисунок 1 – Алгоритм работы установки

Нанесение песчаного слоя осуществляется устройством нанесения песка, приводимым в движение сервоприводом. Внесение отверждающего состава осуществляется рабочим органом аддитивной установки – печатающей головкой.

Основным критерием производительности является время создания единичного слоя, складывающееся из времени нанесения песчаного слоя и времени внесения отверждающего состава в песчаный слой, время на опускание платформы не влияет на общую производительность, т.к. осуществляется одновременно с возвратным движением устройства для нанесения песка или рабочего органа. Для повышения общей производительности установки необходимо сократить время создания единичного слоя. Очевидным решением была бы максимизация скорости перемещения рабочего органа (печатающей головки) и устройства нанесения песка аддитивной установки. Однако простое увеличение скорости перемещения механизмов установки не решит поставленную задачу, т.к. увеличение скорости перемещения ведет к необходимости использования более дорогих комплектующих, что ухудшает конкурентоспособность и нивелирует снижение себестоимости продукции, достигнутое удешевлением расходных материалов. При этом повышение скорости перемещения механизмов ограничено технологическими параметрами работы установки, такими как частота работы печатающей головки, технологические ограничения на скорость нанесения песка, поскольку чрезмерное повышение скорости нанесения приводит к нарушению целостности песчаного слоя, появлению дефектов, снижению плотности упаковки частиц.

Основными способами повышения производительности, требующими исследования, нами выявлено:

1. оптимизация траектории движения пьезоэлектрической печатающей головки;
2. повышение частоты работы пьезоэлектрической печатающей головки;
3. изменение размеры капли, вносимой в песчаный слой;
4. совмещение механизма нанесения песчаного слоя и печатающей головки;
5. увеличение ширины печати за счет повышение количества печатающих головок.

Оптимизация траектории движения пьезоэлектрической печатающей головки

В стандартном варианте (см. рис. 2) алгоритма движения печатающей головки по рабочей зоне аддитивной установки осуществляется последовательное сканирование всей зоны печати. При этом

печатающая головка осуществляет внесение связующего в песчаный слой только в предварительно запрограммированные области, а в остальных зонах происходит холостое движение рабочего органа с неизменной скоростью.

Очевидным шагом в этой ситуации будет ускорение движения рабочего органа во время холостых проходов, при этом ограничение в виде частоты печатающей головки не действует в данном случае, т.к. во время холостого прохода не производится внесение связующего в песчаный слой. Первый вариант оптимизации представлен на рис. 3.

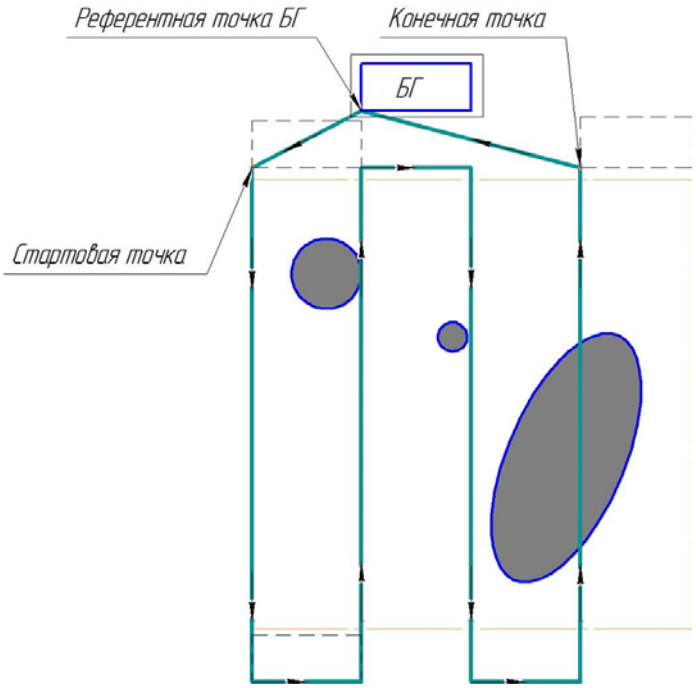


Рисунок 2 – Движение рабочего органа без оптимизации

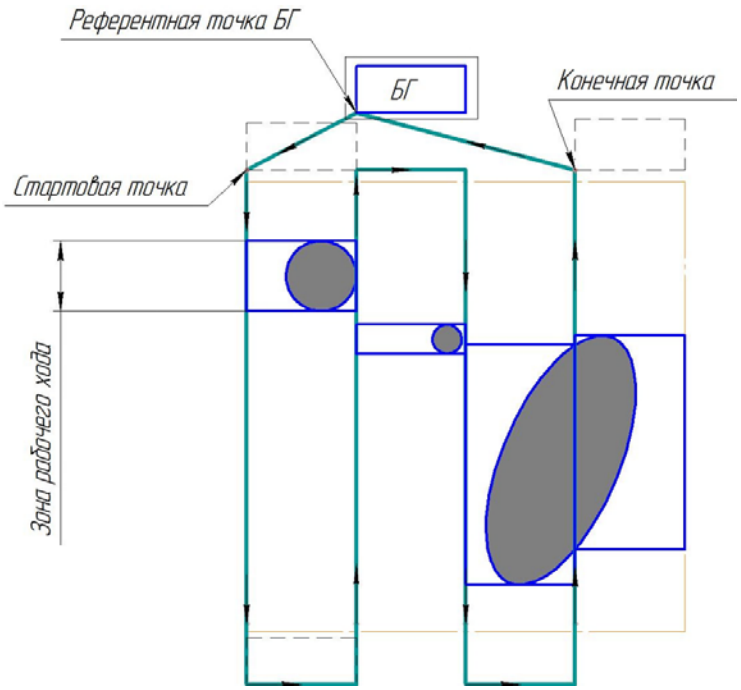


Рисунок 3 – Первый вариант оптимизации

Вторым вариантом оптимизации (см. рис.4), является исключение проходов над зонами, где не происходит внесение связующего в песчаный слой. При этом печатающая головка сразу после прохода над зоной печати смещается к следующей зоне печати.

Предварительный анализ представленных вариантов оптимизации для тестового изображения позволил определить, что первый вариант оптимизации позволит получить выигрыш во времени внесения связующего в слой – 13,4 %, а применение второго варианта оптимизации – 56 %.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что данное направление исследований перспективное, однако необходимо изучить варианты при различных вариантах заполнения рабочей зоны изображением для печати, исследовать влияние участков разгона и торможения и определить граничные условия.

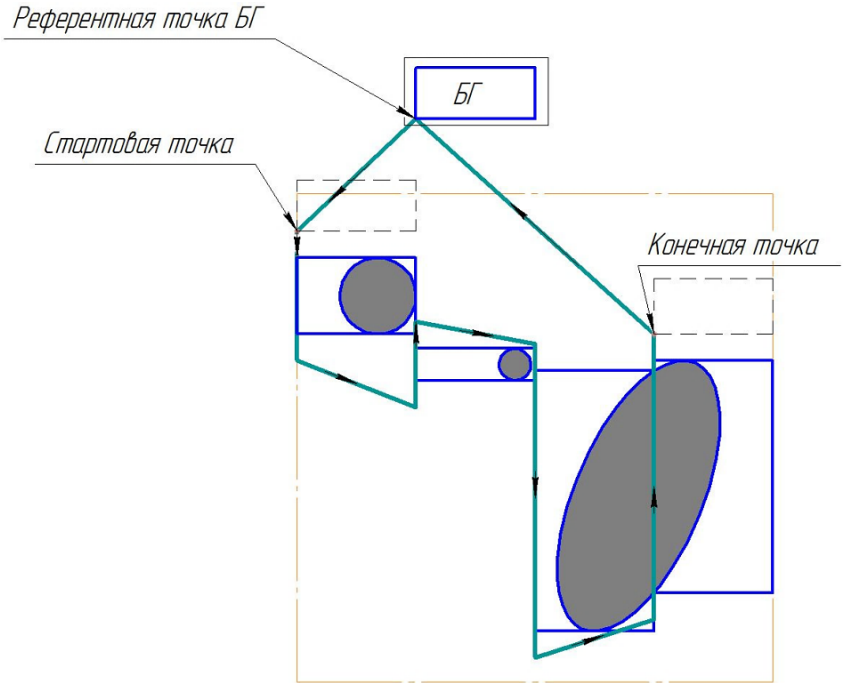


Рисунок 4 – Второй вариант оптимизации

Повышение частоты работы пьезоэлектрической печатающей головки

Вторым способом увеличения производительности является увеличение максимальной скорости рабочего хода печатающей головки. Перемещение рабочего органа в процессе печати ограничивается технологическими параметрами самой печатающей головкой. Для соблюдения необходимой плотности внесения связующего в песчаный слой необходимо соблюдать соотношение частоты работы печатающей головки со скоростью перемещения. В связи с тем, что частота выброса капель связующего из печатающей головки ограничена, простое увеличение скорости перемещения невозможно. Одним из вариантов решения данной задачи является замена печатающей головки на головку с большой частотой работы, однако этот вариант также имеет ограничение по максимальной частоте и применяемым рабочим жидкостям, которые можно использовать в качестве связующего.

Альтернативным вариантом является использование нескольких менее частотных печатающих головок, расположенных друг за другом для получения суммарно более высокой частоты работы (см. рис.5).

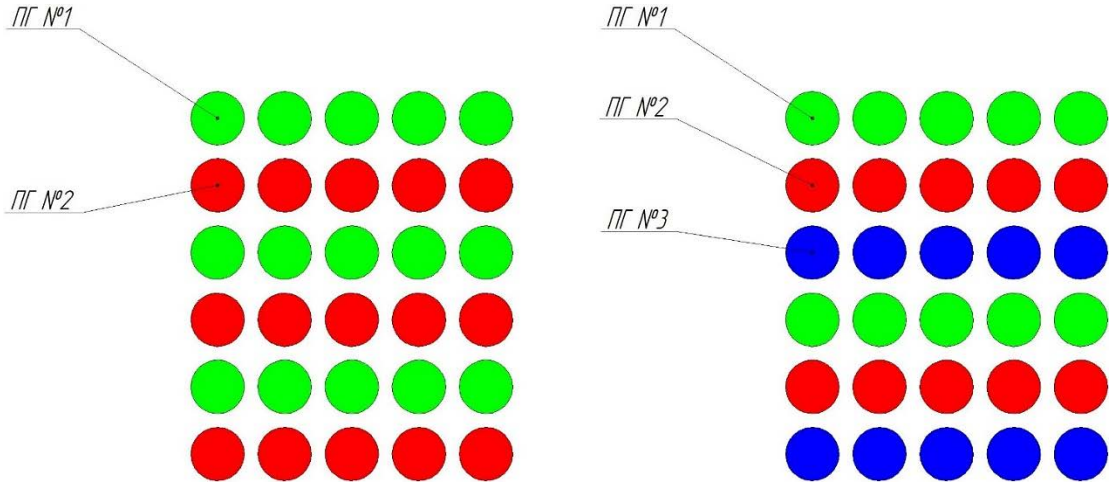


Рисунок 5 – Использование нескольких печатающих головок

При этом изображение разбивается полинейно, линии поочередно загружаются в печатающие головки. Каждая головка вносит соответствующую каплю в песчаный слой с частотой H, при количестве головок n общая частота работы блока головок составляет $n \cdot H$.

Таким образом можно добиться повышения скорости рабочего хода до любого необходимого уровня, однако значительным минусом будет являться большая стоимость, т.к. каждая печатающая головка имеет высокую стоимость и может негативно сказаться на конкурентоспособности установки в целом.

Изменение размеры капли, вносимой в песчаный слой

В связи с тем, что внесение связующего в песчаный слой вносится по каплям, необходимое количество связующего в слой вносится определяется плотностью расположения точек на изображении. Увеличения скорости рабочего хода можно добиться снижением плотности расположения точек. При этом необходимо обеспечить технологические требования по количеству связующего, эту задачу возможно решить за счет увеличения размера капли (см. рис.6).

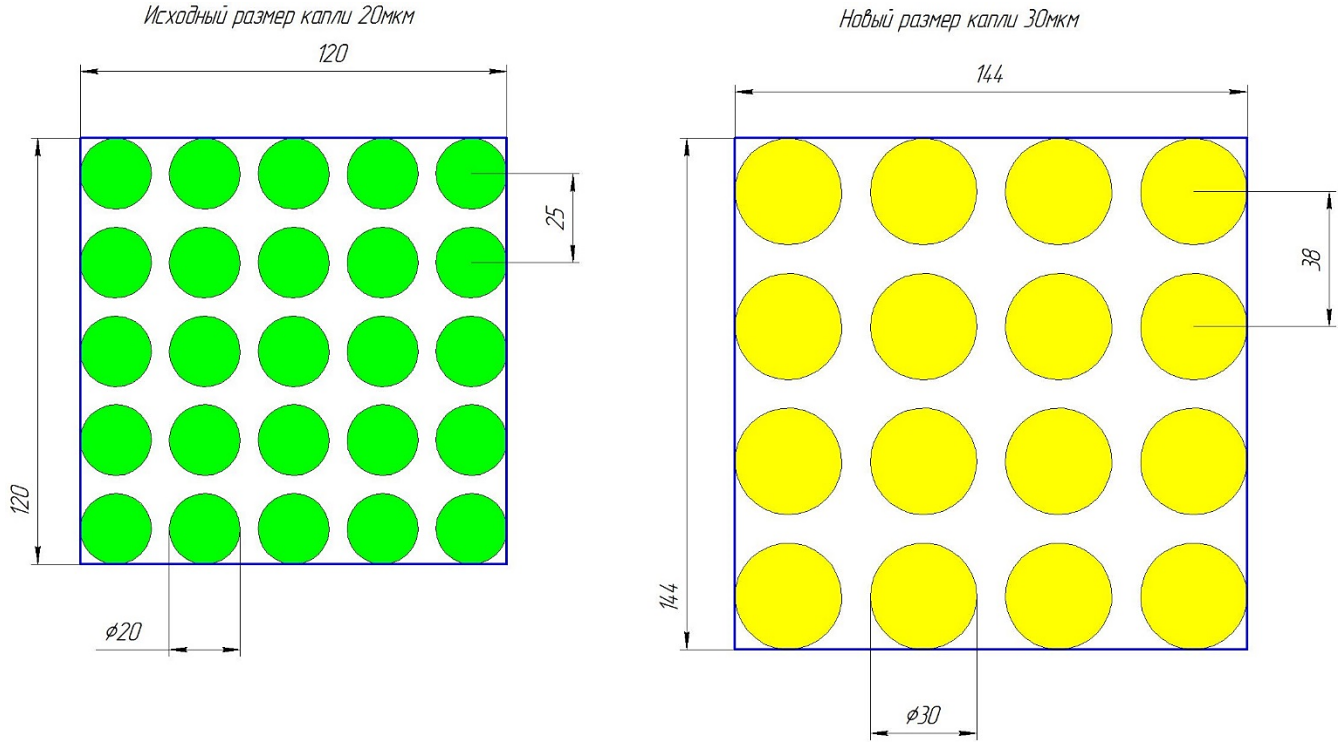


Рисунок 6 – Увеличение размера капли

В первом варианте размер капли 20 мкм, капли расположены с шагом 25 мкм, процент заполнения площади составляет 54,5 %. При увеличении размера капли в 1,5 раза по диаметру и в 2,25 раза по площади – до 30 мкм, и при соблюдении условия заполнения площади в 54,5 % шаг расположения капель увеличивается до 38 мкм. Подобное увеличение шага внесения позволит увеличить скорость рабочего хода в 1,52 раза при одинаковой частоте работы печатающей головки.

Рассмотренный вариант увеличения скорости рабочего хода может быть реализован без замены печатающей головки, т.к. большинство печатающих головок позволяют менять размер капли. Однако предпочтительным является использование печатающей головки с меньшей частотой работы и большим размером капли, т.к. они имеют меньшую стоимость по сравнению с более частотными печатающими головками. При этом следует учитывать, что негативным аспектом в этом варианте является снижение точности и детализации полученных изделий.

Совмещение механизма нанесения песчаного слоя и печатающей головки

Четвертым вариантом исследования возможности увеличения производительности аддитивной установки является совмещение устройства нанесения песка с блоком печатающих головок. В случае раздельной установки этих элементов установки дополнительное время тратится на возврат каждого элемента в «домашнее» положение, ожидание сигнала датчика об успешном достижении положения модулем и последующий запуск следующего элемента. В случае совместного расположения устройства нанесения песка и блока головок возможно сокращение времени создания единичного слоя (см. рис. 7).

Исходя из опытных данных среднее распределение времени по операциям составляет:

– холостой проход портала нанесения песка – 8 %;

– проход портала песка с насыпанием песка – 29 %;

– холостой проход блока головок – 25 %;

– проход блока головок с внесением связующего – 38 %.

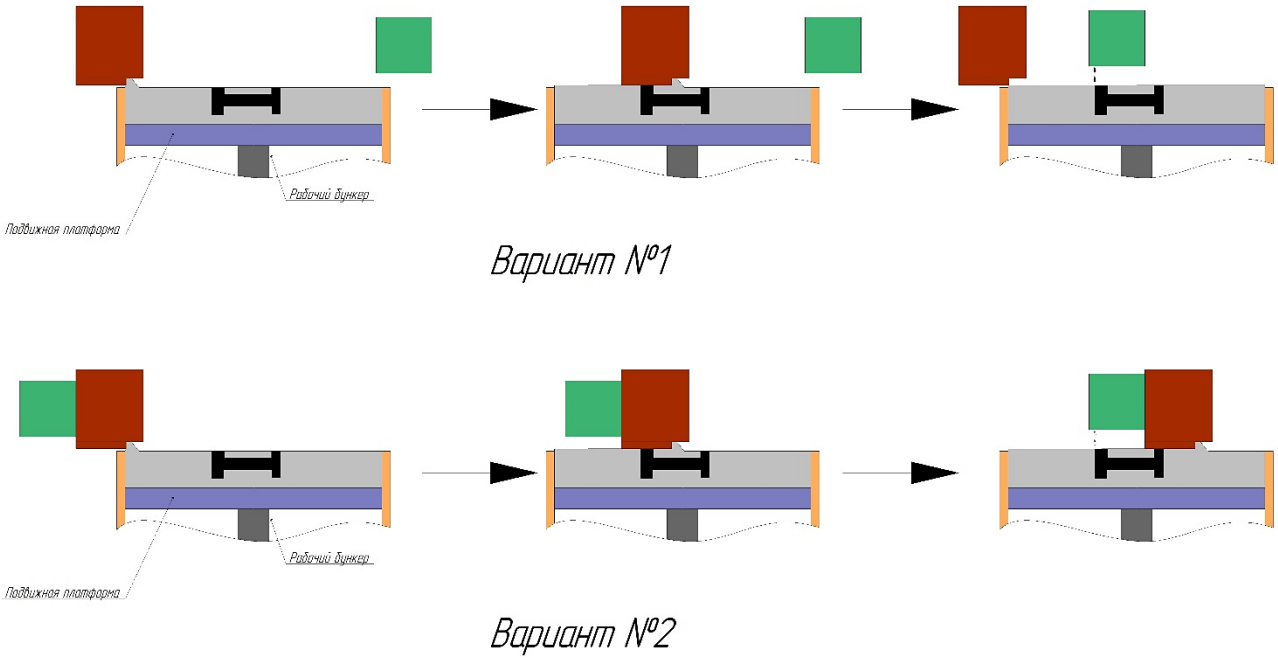


Рисунок 7 – Совмещение устройства нанесения песка и блока головок

При этом сокращается количество операций, совмещаются операции нанесения песка и внесение связующего:

– проход с внесением связующего и нанесением песка – 38 %;

– холостой проход блока головок – 25 %.

Предварительное значение варианта с совмещением устройства нанесения песка с блоком головок составляет 63 % от варианта раздельного исполнения.

Рассмотренный вариант увеличения производительности интересен для дальнейшего исследования, т.к. возможно снижение значения увеличения производительности для установок с большой рабочей зоной, и даже ухудшение показателей в связи с тем, что скорость перемещения рабочего органа обычно значительно выше скорости перемещения устройства нанесения песка, и на больших размерах рабочей зоны совмещение модулей снизит общую производительность устройства. Появляется необходимость провести исследование и определить граничные значения применимости данного способа.

Увеличение ширины печати за счет повышение количества печатающих головок

Заключительный способ увеличения производительности состоит в увеличении ширины прохода печатающими головками за счет увеличения количества печатающих головок. Данный способ позволяет сократить количество проходов блока головок над рабочей зоной, тем самым сократив время создания единичного слоя. Этот способ прост в реализации и дает очевидный эффект в увеличении производительности. Однако увеличение ширины зоны печати должно давать ощутимый эффект, иными словами, – применение данного способа на установках с небольшой зоной построения, где добавление 2-4 печатающих головок дает значительный прирост производительности за счет сокращения количества проходов в 1,5-2 раза. При этом для установок с большой зоной построения для достижения значительного эффекта необходимо увеличить количество головок на 8-16 штук, что значительно увеличит затраты на изготовление установки. Поэтому необходимо исследовать соотношение количества головок к размеру рабочей зоны для установления границ применимости данного способа.

Заключение

Рассмотренные способы увеличения производительности дают различный эффект и имеют различные границы применимости. Для достижения максимального результата имеет смысл комбинировать различные способы между собой. Проведение дальнейших исследований в этой области позволит точнее определить возможный эффект от внедрения. Однако уже сейчас становится ясно, что наиболее перспективным является путь интеллектуализации системы управления, – необходимо повышать качество системы управления путем совершенствования управляющих компонентов, без значительного удорожания конструкции.

Публикация подготовлена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации. Уникальный идентификатор проекта – RFMEFI57517X0162.

T.A. Baidina, S.F. Burdakov, O.B. Shagniev, I.K. Shanshin

THE CONTROL OF VIBRATION IN CONTACT INTERACTION BETWEEN ROBOT AND SURFACE

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, shagniev_ob@spbstu.ru

Abstract

The problem of position-force control of the movement of a robot equipped with a milling cutter is considered in the regime of contact interaction with the machined surface. In accordance with the technological parameters of machining, the robot moves at a given speed along the surface with a specified level of contact force to it. The influence of tool dynamics on the robot is taken into account. The contact of the rotating tool with the machined surface and a certain combination of the milling cutter parameters may give rise to periodic impulse actions on the robot with frequencies close to resonant ones. The variants of the robot and the tool parameters, under which resonance is possible, are considered. The influence of impulse actions on different frequencies on the robot is analyzed. The oscillations of the system when passing through the resonance are investigated. A method of adapting the system by the machine learning is proposed.

Keywords: robot, force sensing, adaptive control, position-force control, math modeling, machine learning, robot-tool-surface

Т.А. Байдина, С.Ф. Бурдаков, О.Б. Шагниев, И.К. Шаньшин

УПРАВЛЕНИЕ ВИБРАЦИЯМИ ПРИ КОНТАКТЕ РОБОТА С ПОВЕРХНОСТЬЮ

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург
shagniev_ob@spbstu.ru

Аннотация

Рассмотрена задача позиционно-силового управления движением робота, оснащённого фрезой, в режиме контактного взаимодействия с обрабатываемой поверхностью. В соответствии с технологическими параметрами механообработки робот движется с заданной скоростью вдоль поверхности с заданным уровнем силы прижатия к ней. Учтено влияние динамики инструмента на робот. В условиях постоянного контакта вращающегося инструмента с обрабатываемой поверхностью при определённом сочетании параметров фрезы возможно возникновение периодических импульсных воздействий на робот с частотами, близкими к резонансным. Рассмотрены варианты параметров робота и инструмента, при которых возможен резонанс. Проанализировано влияние импульсных воздействий на разных частотах на робот. Исследованы колебания системы при прохождении через резонанс. Предложен способ адаптации системы при помощи обучения.

Ключевые слова: робот, силовое очувствление, адаптивное управление, позиционно-силовое управление, математическое моделирование, машинное обучение, робот-инструмент-поверхность

Разработка робототехнических систем, осуществляющих контактные операции на базе алгоритмов позиционно-силового управления, является актуальным направлением развития робототехники. Задачи контактного взаимодействия робота, оснащённого средствами силомоментного очувствления, с окружающими объектами, возникают на сборочных производствах, в обрабатывающей промышленности, медицине и аэрокосмической отрасли[3]. Подобные задачи являются наиболее сложными в робототехнике.

В сфере металлообработки существует целый класс нерешённых проблем автоматического управления. Контактное взаимодействие инструмента с обрабатываемой поверхностью является сложным нелинейным процессом, требующим глубокого анализа и учёта разнообразных факторов. Во многих случаях для решения этих задач силомоментного очувствления оказывается недостаточно. Требуются дополнительные контуры адаптации, обладающие возможностью обучения, как по экспертным данным, так и online в процессе выполнения пробных операций[2]. Для повышения качества связанного позиционно-силового управления необходимо согласовывать механические характеристики руки робота и инструмента, а также учитывать взаимное влияние степеней свободы и разных контуров управления[6].

Робот, оснащённый фрезой, в соответствии с технологической задачей, двигается с некоторой скоростью вдоль поверхности с заданным прижатием к ней. Для обеспечения заданного уровня силы прижатия инструмента к поверхности построен позиционно-силовой алгоритм управления, организованный на базе штатной системы позиционного управления роботом, которая используется в режиме позиционирования робота[1]. В режиме контакта инструмента с поверхностью происходит переключение на режим силового управления, которое производится на основании обратной связи, получаемой от датчика вертикального усилия, установленного на подвесе инструмента. На основании данных от датчика силы прижатия формируется скорректированное задание для системы управления позиционированием робота. Скорректированное задание позволяет сгладить негативное влияние контакта на динамику робота.

Управление горизонтальным движением робота осуществляется на базе позиционного алгоритма управления на основании обратной связи по скорости горизонтального движения. Целью управления является поддержание заданной скорости горизонтального движения робота. За счёт равномерного горизонтального движения и стабильного уровня вертикальной силы прижатия инструмента к поверхности осуществляется механообработка детали. Расчётная схема робота в режиме контакта представлена на рисунке 1.

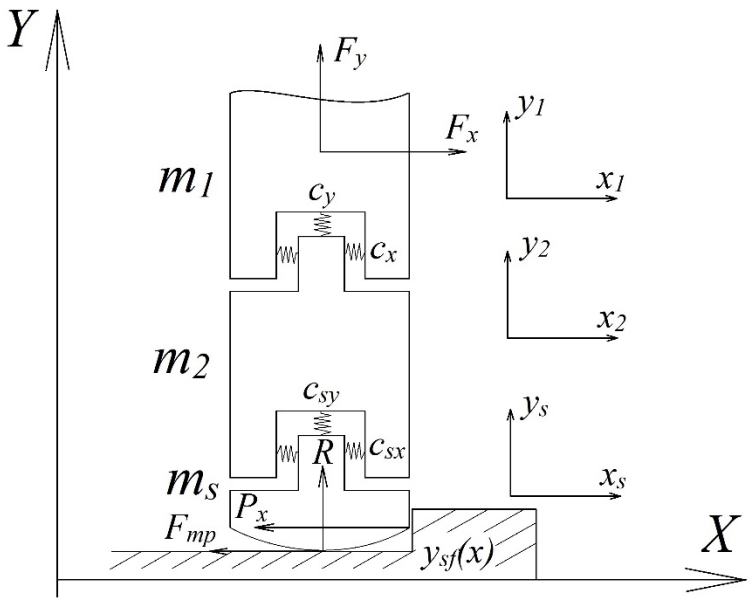


Рисунок 1 – Расчётная схема робота в режиме контакта с обрабатываемой поверхностью

На рис.1 введены следующие обозначения m_1 и m_2 – приведённые массы двигателя и руки робота; m_s – масса инструмента; c_x и c_y– эквивалентные жёсткости робота в горизонтальном и вертикальном направлениях; c_{sx} и c_{sy}– эквивалентные жёсткости инструмента в горизонтальном и вертикальном направлениях; y_1 и y_2 – вертикальные координаты двигателя и руки робота; x_1 и x_2 – горизонтальные координаты двигателя и руки робота; x_s и y_s– горизонтальная и вертикальная координаты инструмента; $y_{sf}(x)$ – уравнение обрабатываемой поверхности; $F_{\text{тр}}$ – сила трения; R – сила вертикальной реакции; P_x – суммарная сила сопротивления срезаемого слоя. Предполагается, что координаты робота и инструмента учитывают их конструктивные размеры.

В режиме контакта математическая модель очувствлённого робота как объекта управления имеет вид:

$$\begin{cases} m_1\ddot{y}_1 + b_{1y}\dot{y}_1 + c_y(y_1 - y_2) = F_y - m_1 g \\ m_2\ddot{y}_2 + b_{2y}\dot{y}_2 + c_y(y_2 - y_1) + c_{sy}(y_2 - y_s) = -m_2 g \\ y_s = y^{sf}(x) \\ F_y = \left(k_p + k_i\frac{1}{p} + k_d\frac{N}{1+N\frac{1}{p}}\right)\left(\widetilde{y^d} - y\right) \\ m_1\ddot{x}_1 + b_{1x}\dot{x} + c_x(x_1 - x_2) = F_x \\ m_2\ddot{x}_2 + b_{2x}\dot{x}_2 + c_x(x_2 - x_1) + c_{sx}(x_2 - x_s) = 0 \\ m_s\ddot{x}_s + b_{sx}\dot{x} + c_{sx}(x_s - x_2) = F_{\text{тр}} + P_x \\ F_x = \left(k_{px} + k_{ix}\frac{1}{p} + k_{dx}\frac{N_x}{1+N_x\frac{1}{p}}\right)\left(\dot{x}^d - \dot{x}\right) \end{cases}$$

В режиме контакта задание $\widetilde{y^d}$ формируется при помощи отдельного PID-регулятора на основании обратной связи по силе вертикального взаимодействия инструмента и поверхности

$$\widetilde{y^d} = W(p)(F_s^d - F_s),$$

где $W(p) = \theta_p + \theta_i\frac{1}{p} + \theta_d\frac{N_f}{1+N_f\frac{1}{p}}$.

θ_p, θ_i, θ_d и N_f – параметры настройки PID-регулятора, управляющего контактной силой. Заданный уровень силы вертикального прижатия робота к поверхности принят F_s^d=40Н.

При помощи компьютерного моделирования были подобраны следующие параметры системы:

$$m_1 = m_2 = 1 \text{ кг};\ m_s = 0{,}2 \text{ кг};\ c_y = c_x = 2{,}2 \cdot 10^5 \text{ Н/м};\ b_{sx} = b_{sy} = 5 \text{ Нс/м}$$

$$c_{sx} = c_{sy} = 10^4 \text{ Н/м};\ b_{1y} = b_{2y} = b_{1x} = b_{2x} = 20 \text{ Нс/м}.$$

Для простоты введены обозначения $c_s = c_{sx} = c_{sy};\ b_1 = b_{1x} = b_{1y};\ b_2 = b_{2x} = b_{2y};\ c = c_y = c_x$.

Эти параметры позволили оценить частотные характеристики трёхмассовой модели робота[7]:

Для режима отсутствия контакта:

$$A = \frac{1}{2}\left(\frac{c}{m_1} + \frac{c+c_s}{m_2} + \frac{c_s}{m_s}\right); B = cc_s\left(\frac{1}{m_1 m_2} + \frac{1}{m_2 m_s} + \frac{1}{m_1 m_s}\right);$$

$\omega_{1y} = \omega_{1x} = A - \sqrt{A^2 + B} \cong 233$ рад/с $\cong 37$ Гц – первые собственные частоты горизонтальных и вертикальных колебаний системы при отсутствии контакта.

$\omega_{2y} = \omega_{2x} = A + \sqrt{A^2 + B} \cong 668$ рад/с $\cong 106$ Гц – вторые собственные частоты горизонтальных и вертикальных колебаний системы при отсутствии контакта.

Для режима контакта:

$$A = \frac{1}{2}\left(\frac{c}{m_1} + \frac{c+c_s}{m_2}\right); B = cc_s\left(\frac{1}{m_1 m_2}\right);$$

$\omega_{1y} = \omega_{1x} = A - \sqrt{A^2 + B} \cong 70$ рад/с $\cong 11$ Гц – первые собственные частоты горизонтальных и вертикальных колебаний системы при наличии контакта инструмента с поверхностью.

$\omega_{2y} = \omega_{2x} = A + \sqrt{A^2 + B} \cong 667$ рад/с $\cong 106$ Гц – вторые собственные частоты горизонтальных и вертикальных колебаний системы при наличии контакта инструмента с поверхностью.

В условиях контакта между инструментом и обрабатываемой поверхностью присутствуют силы взаимодействия. При съёме материала фрезой необходимо учитывать взаимное влияние инструмента и робота. На рисунке 2 представлена расчётная модель фрезы.

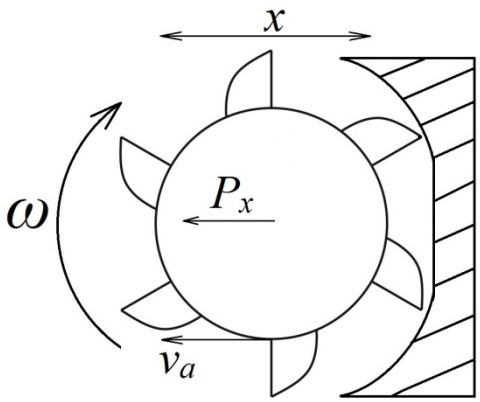


Рисунок 2 – Расчётная схема фрезы

Характерными параметрами инструмента при фрезеровании являются скорость резания v_a (м/мин), подача s (мм/зуб), диаметр фрезы d (мм), число режущих кромок (зубьев) n [5].

При движении вдоль горизонтальной оси робот снимает некоторый слой материала. Принимается, что для этого ему необходимо преодолеть постоянную часть силы сопротивления P_x^d.

При этом в результате вращения фрезы на инструмент действует дополнительная сила ΔP_x, обусловленная реакцией материала на периодическое воздействие зубьев фрезы. Таким образом, $P_x = P_x^d + \Delta P_x$.

Частота импульсного воздействия ΔP_x и угловая скорость вращения фрезы ω могут быть вычислены на основании параметров фрезы[4]:

$$f_p = n\frac{v_a}{60\pi d};\ \omega = \frac{v_a}{60(d/2)}$$

Значения частоты f_p могут варьироваться в диапазонах, обусловленных диапазонами значений основных параметров. Наиболее опасным является случай нахождения частоты импульсного воздействия на инструмент вблизи собственных частот робота. Исходя из характерных диапазонов для случая обработки стали, были подобраны соотношения основных параметров фрезы, которые приводят к таким ситуациям. Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры фрезы

v_a, м/мин	n	d, мм	f_p, Гц	ω, рад/с
25	4	14	38	60
14	6	12	37	39
35	4	20	37	58
25	8	10	106	83
32	10	16	106	67
40	10	20	106	67

Важно отметить, что для нормального режима механообработки частота вращения инструмента, находящаяся в районе первой собственной частоты робота в режиме контакта с поверхностью 11 Гц не характерна. Однако следует учитывать, что случаи прохождения через резонанс возможны не только при совпадении определённых параметров инструмента, но и в процессе набора инструментом необходимой скорости вращения, а также в результате нештатных ситуаций[8].

Значение постоянной силы сопротивления p_x^d=40Н принималось соразмерно силе вертикального прижатия F_s^d. Сила сопротивления P_x^d в режиме нормальной работы преодолевается силой горизонтальной упругости инструмента F_{sx}. Амплитуда импульсного воздействия ΔP_x принималась равной 40 Н, чтобы импульс не мог оторвать инструмент от срезаемой кромки. Характер импульса принимался в виде положительной части синуса. На рисунке 3 приведены графики импульсного воздействия с частотами 37Гц (а) и 106 Гц (б).

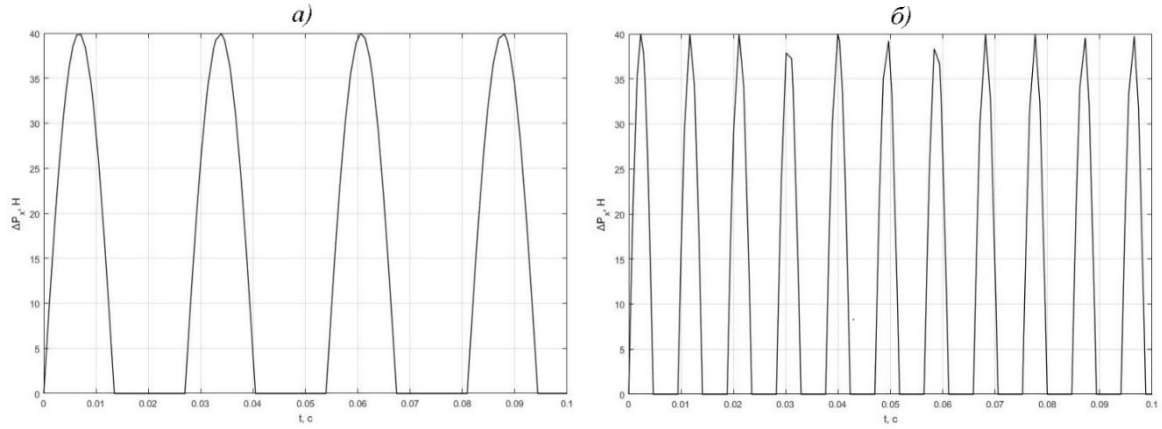


Рисунок 3 – Импульсные воздействия на резонансных частотах 37 Гц (а) и 106 Гц (б)

Выход на уровень силы горизонтального прижатия 40 Н осуществляется плавно по линейному закону $F_{sx}^d(t) = 40t$, то есть в течение 1 сек. Это позволяет не допустить перерегулирования и больших размахов колебаний в начале движения. Форму обрабатываемой поверхности считаем плоской $y^{sf}(x) = 0$. Исходя из характерных для механообработки стали диапазонов значений подачи $s = 0{,}1 \div 0{,}2$ мм/зуб задание по скорости горизонтального движения принималось $\dot{x}^d = 0{,}01$ м/с. Трение считаем линейным и мало влияющим на динамику робота.

На рисунке 4 приведены графики горизонтальных координат робота x_s и инструмента x_2 и горизонтальной контактной F_{sx} силы при импульсном воздействии на резонансной частоте 37 Гц (а) и на резонансной частоте 106 Гц (б).

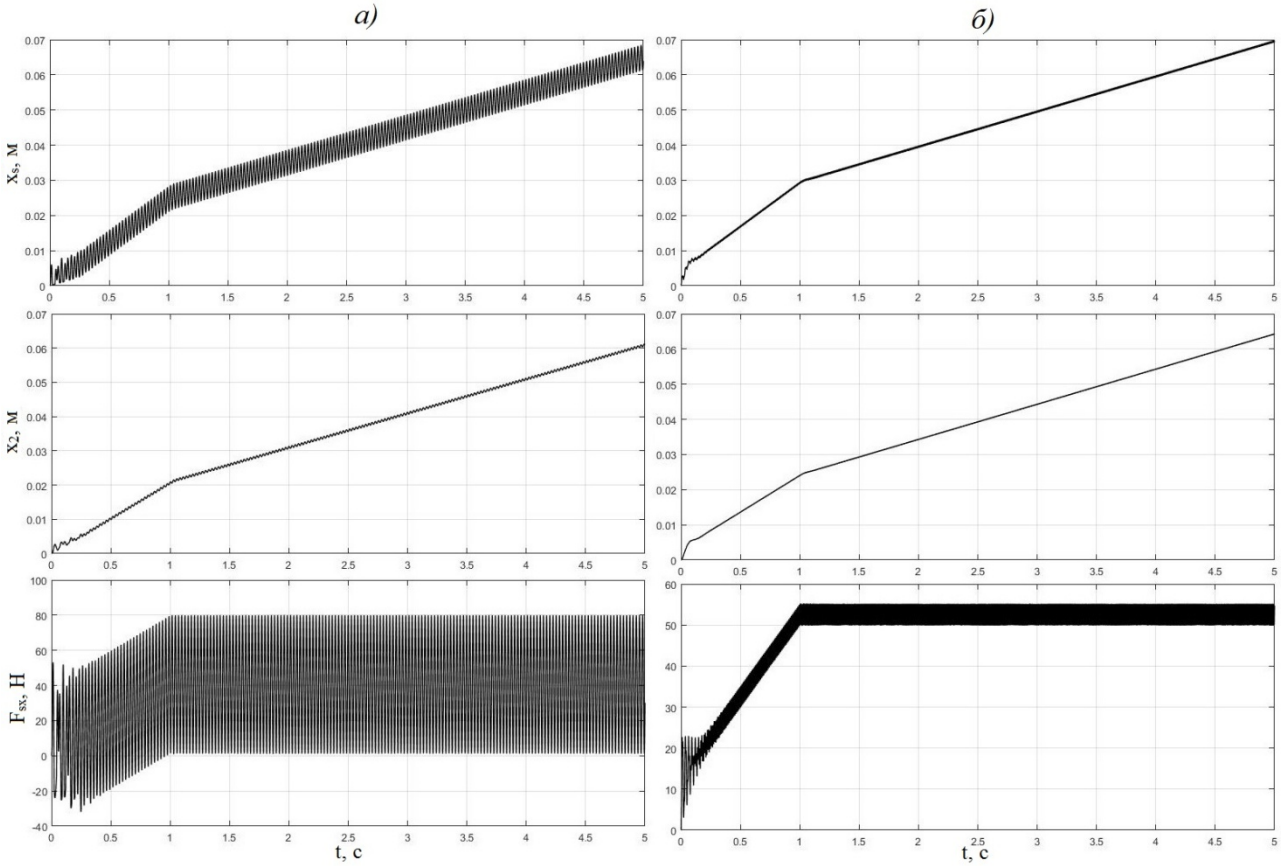


Рисунок 4 – Графики горизонтальных координат робота и инструмента и горизонтальной контактной силы при импульсном воздействии на частоте 37 Гц (а) и 106 Гц (б)

Импульсное воздействие на резонансной частоте 37 Гц приводит к отклонениям горизонтальной силы контакта от заданного уровня 40Н приблизительно вдвое. Резонанс на частоте 106 Гц также присутствует, однако за счёт большой разницы жёсткостей робота и инструмента его влияние на контактную силу невелико. Понятно, что двукратное отклонение силы взаимодействие от технологии будет отрицательно сказываться на результатах механообработки. Более того, за счёт неправильного съёма материала может возникнуть накопление ошибки и дополнительное влияние неровной поверхности на инструмент и робот[10].

С целью недопущения возникновения резонансных колебаний предлагается построение дополнительного контура адаптации. При возникновении предпосылок для возникновения резонанса за счёт изменения частоты вращения фрезы ω необходимо выходить из опасного частотного диапазона[9].

На рисунке 5 представлены импульсные воздействия ΔP_x при условии, что частота импульсного воздействия изменяется по линейному закону (а) и по квадратичному закону (б) в диапазоне от 0 до 400 рад/с.

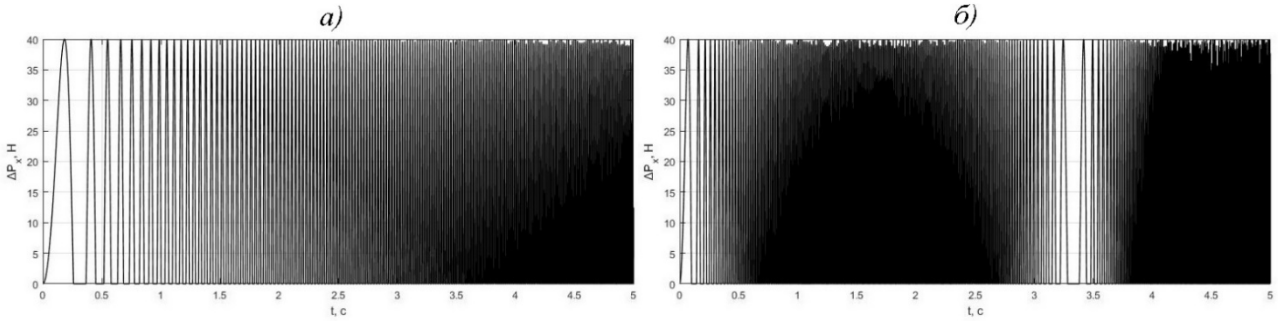


Рисунок 5 – Импульсные воздействия с частотой, меняющейся по линейному закону (а) и по квадратичному закону (б)

На рисунке 6 приведены графики горизонтальных координат робота x_s и инструмента x_2 и горизонтальной контактной силы F_{sx} при изменении частоты импульсного воздействия по линейному закону (а) и по квадратичному закону (б).

Видно, что при изменении частоты импульсного воздействия в диапазоне от 0 до 400 Гц происходит несколько переходов через резонанс. Это сопряжено с серьёзными отклонениями от заданного уровня силы контакта F_{sx}^{d}=40Н. Характер графиков горизонтальной силы F_{sx} показывает, что возникновение резонансных колебаний может быть предсказано заранее.

Для автоматической коррекции режима механообработки необходимо использовать контур адаптации, который позволит согласовать диапазоны рабочих частот системы “робот-инструмент-поверхность”, скорости движения вдоль обрабатываемой поверхности, силы прижатия инструмента к ней, а также режимы механообработки. В условиях применения робототехнических комплексов на массовом производстве актуальной является задача интеллектуализации контуров адаптации с помощью обучаемых нейронных сетей. При наборе большого объёма статистических данных появляется возможность на ранних стадиях идентифицировать признаки возникновения резонансных колебаний и скорректировать параметры механообработки в режиме реального времени, при этом не нарушая технологию механообработки.. Внедрение подобных систем на производстве позволит на больших партиях серьёзно снизить процент брака и увеличить производительность.

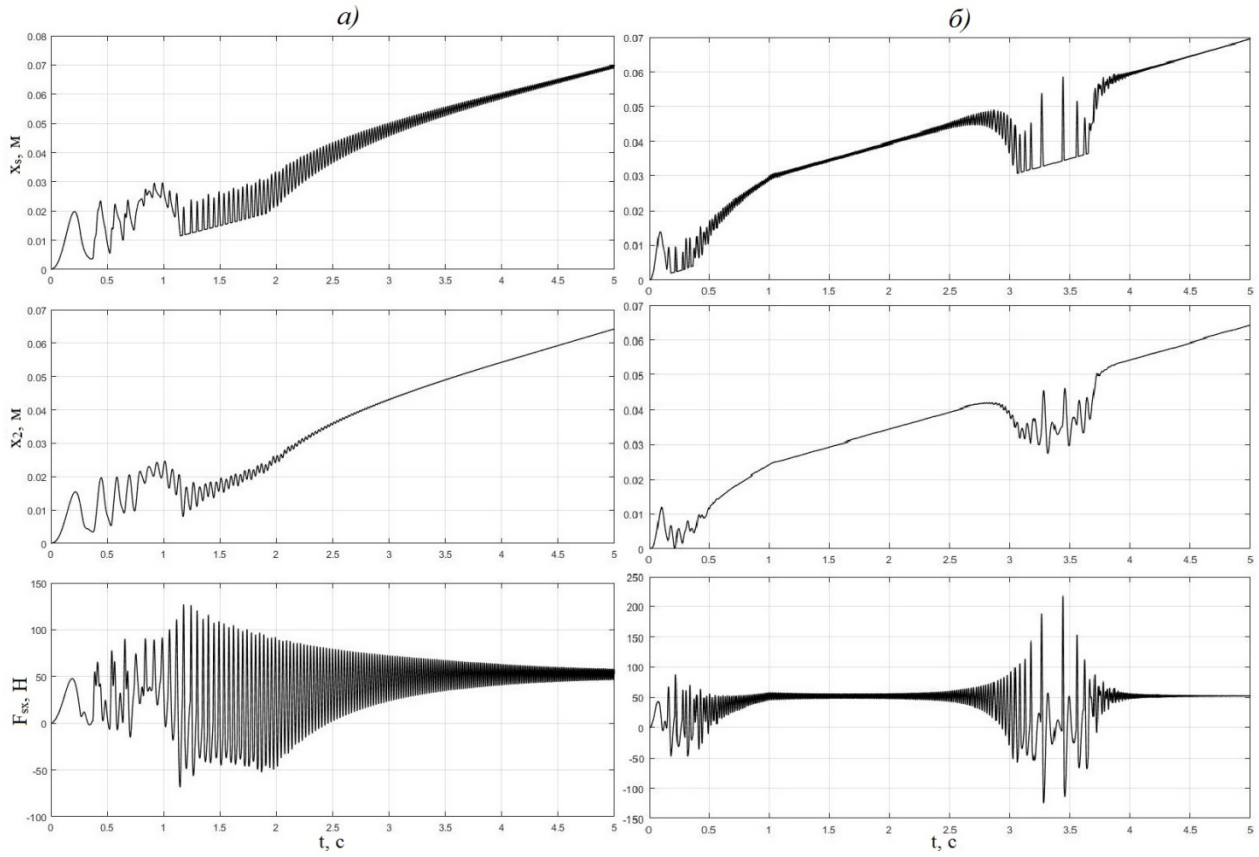


Рисунок 6 – Графики горизонтальных координат робота и инструмента и горизонтальной контактной силы при изменении частоты импульсного воздействия по линейному закону (а) и по квадратичному закону (б)

1. Бурдаков С.Ф., Шагниев О.Б. Модели механики в задаче управления силовым взаимодействием робота с поверхностью неопределенного профиля// НТВ СПбПУ. 2015. №4. С. 68-79.
2. Егоров И. Н. Позиционно-силовое управление робототехническими и мехатронными устройствами. Владимир: Изд-во Владимир. Гос. Ун-та, 2010. 192с.
3. Попов А.В., Юревич Е.И. Позиционно-силовое управление манипуляторами: состояние и перспективы // Мехатроника, автоматизация и управление. 2008. № 5. Приложение. С. 2–6.

4. Воронов С.А., Непочатов А.В., Киселёв И.А. Критерии оценки устойчивости процесса фрезерования нежёстких деталей// Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2011. № 1. С. 50-62.
5. Грановский Г.И., Грановский В.Г. Резание металлов. М.: Высшая школа, 1985.
6. Гориневский Д.М., Формальский А.М., Шнейдер А.Ю. Управление манипуляционными системами на основе информации об усилиях/ Под ред. В.С. Гурфинкеля и Е.А. Девянина. – М.: Физматлит, 1994. – 368 с.
7. Бурдаков С.Ф. Математические модели и идентификация роботов с упругими элементами: Учебю пособие. – Л.: ЛГТУ, 1990. – 96 с.
8. Мурашкин Л.С., Мурашкин С.Л. Прикладная нелинейная механика станков. Д.: «Машиностроение» (Ленингр. отд-ние), 1977. 192 с.
9. Иванов И.И., Воронов С.А., Николаев С.М., Куць В.А. Моделирование вибраций при плоском фрезеровании с коррекцией частоты вращения в режиме реального времени// Наука и Образование МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. Журн. 2017. № 03. С. 1-16.
10. Бурдаков С.Ф., Байдина Т.А., Шагниев О.Б. Управление вибрационным состоянием робота при силовом взаимодействии с шероховатой поверхностью неопределённого профиля// НТВ СПбПУ. 2016. №4. С. 43-52.

I.E. Novikov

STUDY OF THE POSSIBILITIES OF THE EARTH'S SURFACE AERIAL RADIATION MONITORING EFFICIENCY INCREASING

Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics, Saint-Petersburg
novikov@rtc.ru

Abstract

The problems of searching for local sources of gamma radiation and remote measuring the dose rate of gamma radiation at a height of 1 meter above the ground are solved.

Software complex for mathematical simulation of processes of transfer and registration of gamma-radiation and methods and algorithms for spectrometric information processing are developed to obtain and ensure systems for the earth's surface aviation radiation monitoring.

Key words: aviation radiation monitoring, environmental media monitoring, gamma-radiation spectrometers, Monte-Carlo methods, local gamma-radiation sources search, gamma-radiation dose rate measurment.

И.Э. Новиков

ИЗУЧЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКОГО АВИАЦИОННОГО РАДИАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ

ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург
novikov@rtc.ru

Аннотация

Решаются задачи поиска локальных источников гамма-излучения и дистанционного измерения мощности дозы гамма-излучения на высоте 1 метра над поверхность Земли.

Разработаны программный комплекс математического моделирования процессов переноса и регистрации гамма-излучения, а также методы и алгоритмы обработки спектрометрической информации для проектирования и обеспечения систем авиационного радиационного мониторинга поверхности Земли.

Ключевые слова: авиационный радиационный мониторинг, контроль природных сред, спектрометры гамма-излучения, Методы Монте-Карло, поиск локальных источников гамма-излучения, измерение мощности дозы гамма-излучения.

Введение

Актуальность работы обусловлена необходимостью модернизации существующих и разработки новых современных систем авиационного радиационного мониторинга (АРМ) поверхности Земли [1] для улучшения их тактико-технических характеристик, повышения конкурентоспособности и обеспечения возможности эффективного решения с их помощью ряда задач в сфере современной радиационной безопасности [2], что требует также наличия или создания соответствующих эффективных средств их проектирования. Для решения этих задач необходимо наличие соответствующего аппаратурного [3], а также методического, алгоритмического и информационного [1] обеспечения. Решать эти вопросы необходимо на основании тщательного изучения исторического опыта, анализа потенциала и тенденций развития данного направления, в частности уникального отечественного опыта, полученного в результате ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС 1986 г. [4].

Очевидно, широкое применение человечеством радиоактивности в самых различных сферах своей деятельности создает потенциальную угрозу нежелательного проникновения радиоактивных веществ в окружающую среду вследствие аварий, халатности или умышленных действий, включая и крупные аварии, что требует наличия соответствующих средств контроля за радиоактивными веществами и их воздействием на окружающую среду. Авария на атомной электростанции «Фокусима-1» в Японии в 2011 году в очередной раз показала, что в настоящее время реализация такого контроля остается весьма актуальной задачей, несмотря на значительные меры безопасности, применяемые в атомной энергетике и в других областях, где приходится иметь дело с этими веществами. Одним из наиболее эффективных способов реализации такого контроля может быть правильно подготовленный и организованный АРМ. К его существенным преимуществам относится возможность проводить экспрессную оценку радиационной обстановки больших территорий и осуществлять необходимые измерения без непосредственного пребывания персонала и аппаратуры в опасной зоне, особенно в тех случаях, когда непосредственный доступ в зону заражения затруднен из-за завалов, пожаров, наличия опасных физических и химических полей и других осложняющих факторов.

В монографии [1], соавтором которой является автор данной статьи, в систематической форме изложены обзор истории становления, основные термины и определения аэрокосмического радиационного мониторинга Земли, его роль и место в глобальном мониторинге окружающей среды. Описаны классификация и физические основы методов определения основных интегральных и дифференциальных характеристик гамма-поля, формирующегося в атмосфере над радиоактивно загрязненной местностью.

АРМ согласно [1] — это система непрерывных или систематических наблюдений, анализа и прогноза естественных и антропогенных изменений радиационной обстановки наземной поверхности, акватории и в атмосфере с помощью авиационных средств, с целью принятия решений для управления в различных областях человеческой деятельности. Под радиационной обстановкой на земной поверхности, акватории и в атмосфере понимают условия, возникающие в результате естественной радиоактивности почв, горных пород и газов, а также антропогенного радиоактивного загрязнения, которые оказывают влияние на человеческую деятельность.

АРМ поверхности Земли подразумевает дистанционное измерение или оценку характеристик поля гамма-излучения и в некоторых случаях измерение поля нейтронного излучения (в счетном режиме и при наличии делящихся радионуклидов). Спектрометрические измерения возможны только для поля гамма-излучения. Ниже, если не оговорено особо, речь в статье идет о спектрометрических измерениях поля гамма-излучения от техногенных радиоактивных загрязнений на поверхности Земли, возможно с учетом естественного фона.

Исторически сложилось так, что разработка систем АРМ [1,4,5,14,17] представляет собой весьма ограниченную область деятельности в рамках ядерного приборостроения [22], как по объему проводимых научных исследований, так и по количеству задействованных специалистов. Характерным для АРМ является тенденция использования готовых решений, заимствованных из других более развитых смежных областей, таких как лабораторные и полевые наземные радиационные измерения. Недостаточный учет специфики данной области применения может привести к серьезным сложностям в процессе практической реализации таких решений и низкой эффективности АРМ. По этой причине существует потребность разработки специализированных методов и средств

обеспечения радиационного мониторинга, оптимизированных непосредственно для решения задач АРМ, к которым могут быть отнесены специализированные методы и средства проектирования и градуировки аппаратуры, получения и обработки спектрометрической информации и т. д.

Основные сложности при решении измерительных задач АРМ по сравнению с более традиционными лабораторными или полевыми наземными радиационными измерениями состоят в возможности наличия неблагоприятной комбинации факторов, при том, что известные эффективные решения разработаны для условий измерения, когда эти факторы проявляются по отдельности. Возможны два подхода при поиске возможных решений в такой ситуации: во-первых, поиск специфического для данной области частного решения, за счет определения фиксированного наиболее типичного варианта условий, позволяющего обойтись без разработки и применения сложного математического аппарата; во-вторых, поиск общего решения за счет синтеза различных известных методов на базе выработки более общего подхода и разработки соответствующего математического аппарата. В первом случае при отклонении от фиксированного набора условий возникает систематическая погрешность, ведущая к грубой оценке результата измерения, во втором случае необходимо привлечение специалистов высокого уровня и продолжительной работы научно-исследовательской работы, иногда без гарантированного получения положительного результата. До аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 г. при разработке систем АРМ ЦНИИ РТК работы велись в основном в рамках первого подхода. Уникальность опыта ликвидации последствий аварии на ЧАЭС в 1986 г., состоит в том, что в результате этого возникла потребность в развитии второго (более универсального) подхода, при этом необходимые условия и ресурсы в то время имелись, что дало существенный импульс для развития работ в данном направлении в нашей стране. Однако, в результате экономического кризиса и скорого распада СССР многие работы, начатые в этом направлении, не были завершены и после распада СССР имели существенно ограниченное и эпизодическое продолжение в отдельных организациях, иногда в инициативном порядке. К сожалению, в настоящее время в России нет такой концентрации специалистов высокого уровня в нужных областях, также нет аналогичных финансовых и организационных возможностей, в то время как потребность в возможности решения таких задач, безусловно, сохраняется [2]. По этой причине анализ опыта и некоторые результаты работ проводимых ЦНИИ РТК в указанном направлении может представлять повышенный интерес для потенциальных разработчиков систем АРМ и в смежных областях.

Следует особо отметить, что весьма актуальной остается проблема градуировки средств АРМ, особенно по площадным источникам. Натурные испытания являются весьма дорогостоящими и требуют применения источников гамма-излучения высокой активности, опасных для здоровья людей и способных загрязнить окружающую среду, в ряде случаев подобные испытания принципиально невозможны. В случае проведения градуировки по естественным нуклидам, например для геологических целей, существует возможность использовать для этих целей специально аттестованные естественно-природные площадки с известным распределением этих нуклидов. Использовать аттестованные естественно-природные площадки для градуировки аппаратуры в нашем случае не представляется возможным, так как необходимо иметь возможность проводить измерения для большого числа техногенных радионуклидов, некоторые из которых быстро распадаются и в естественных условиях не встречаются. Возможным способом решения этой проблемы является применение методов математического моделирования (методов Монте-Карло) [12]. Ситуация осложняется тем, что данный класс задач имеет свою существенную специфику [1], которая, может не учитываться в достаточной мере в известных программах широкого профиля (в частности MCNP), что в ряде случаев приводит к значительным сложностям или невозможности их практического применения для этих целей. Также необходимо учитывать возможные сложности при получении лицензии на использование таких программных продуктов. Наиболее часто применяемая для этих целей программа MCNP (Monte Carlo N-Particle transport code), разработанная в США в Лос-Аламосской национальной лаборатории, попадает под экспортные ограничения Министерства энергетики США, а доступ к этой программе (платный для граждан РФ) предоставляется по индивидуальной лицензии на основании. решения центра по информации о радиационной безопасности США. Отечественный рынок программ, использовавших такие методы, развалился еще в девяностые годы. Как показывает опыт ЦНИИ РТК эффективное решение этой проблемы даже с учетом реальных ограниченных ресурсов возможно путем разработки специализированных

математические методов и реализующих их программных средств, непосредственно оптимизированных для решения данных измерительных задач и эффективно учитывающих специфику условий измерений.

Краткий исторический обзор

Изначально отечественные исследования в области радиационного мониторинга, включая, авиационные проводились в рамках атомного проекта в СССР [22]. Можно выделить два основных смежных направления использования АРМ: во-первых, ориентированное на измерение излучения естественных радионуклидов для решения задач геологии [23] и геофизики [19]; во-вторых, ориентированное на измерение излучения радионуклидов искусственного происхождения для решения задач радиационной безопасности. Первое направление изначально использовалось для поиска урановых месторождений и выполнялось профессиональной аппаратурой. Втрое направление связанно с измерениями загрязнения окружающей среды и критических объектов в результате взрывов ядерных зарядов или других ядерных инцидентов, в частности авариями на ядерном объекте типа АЭС. Второе направление активно освещалось в трудах академика Ю.А. Израэля [21]. Первоначально предполагалось, что такое загрязнение может возникнуть главным образом в результате радиоактивных выпадений после атомных взрывов, что предполагает его известный однородный характер. Акцент при измерениях делался на использовании сравнительно простых методов и приборов, не требующих сложных профессиональных навыков при их использовании. Сложные профессиональные спектрометрические приборы выполняли при этом ограниченную вспомогательную роль и могли использоваться для тестирования другой более простой аппаратуры, углубленного анализа критических объектов инфраструктуры или поиска слабовыраженных точечных источников излучения. Информация о крупных ядерных авариях до 1986 г. в основном носила закрытый характер. Коренной перелом в этом вопросе произошел в результате аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 г. После событий, связанных с аварией на Чернобыльской АЭС в 1986 г. [19,20], получил развитие новый импульс в развитии конкретно экологического направления связанного с ликвидацией последствий крупных аварий на ядерных объектах. Были переосмыслены прежние подходы и получен большой опыт практической работы в этом направлении. Весьма положительную роль для развития этого направления сыграли такие факторы как наличие общенациональной сверхзадачи, преодоление межведомственных барьеров и политика гласности в этом вопросе. В результате сформировалось новое понимание целей исследований и разработок в этой области, в частности, уникальный реальный опыт ликвидации последствий Чернобыльской аварии 1986 г. однозначно доказывает эффективность комплексного и системного подхода к решению задач радиационного мониторинга при крупных ядерных авариях [22]. Это также дало мощный импульс к развитию многоканальных аппаратурно-программных комплексов нового поколения [3, 17], автоматизированных систем радиационного контроля и соответствующего обеспечения к ним. Результаты этих работ были широко отражены в публикациях того времени, некоторые работы были опубликованы после распада СССР [1,4,19,20,21]. В монографии [1] рассмотрен аэрокосмический радиационный мониторинг Земли как часть мониторинга окружающей среды. В сборнике [4] рассмотрена роль и место авиационных гамма-спектрометров по результатам их использования при ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 г в контексте общих целей, принципов и возможностей применения прикладной гамма-спектрометрии в интересах ядерных технологий и радиационной безопасности. После 2010 года научные публикации, содержащие методологию по разработке систем спектрометрического АРМ искусственных загрязнений поверхности Земли, кроме ЦНИИ РТК ([1] в соавторстве) выполняли также АТОМТЕХ [3], ИБРАЭ РАН [16], УрФУ [17].

Воздушный комплекс радиационной разведки.

Ниже рассмотрим пример многоканального комплекса АРМ разработанного в ЦНИИ РТК с учетом опыта ликвидации последствий Чернобыльской аварии 1986 г. Стоит особо отметить, что в свое время сотрудники ЦНИИ РТК имели непосредственный опыт участия в ликвидации последствий этой аварии, также там применялась ранее разработанная аппаратура ЦНИИ РТК.

По результатам анализа опыта ликвидации последствий Чернобыльской аварии в Государственном научном центре РФ ЦНИИ РТК был разработан уникальный комплекс радиационной разведки и поиска источников ионизирующих излучений в состав, которого входили воздушный и наземный комплексы радиационной разведки, а также наземный вычислительный комплекс [4].

Входящий в его состав воздушный комплекс радиационной разведки (ВКР) [2,4,5] предназначен для обследования больших площадей, на которых произошло или могло произойти радиоактивное заражение местности. Размещение и вид пульта управления ВКР показаны на рисунке 1.

Рисунок 1 – Воздушный комплекс радиационной разведки

Размещение и вид пульта управления

Аппаратура ВКР предназначена для нахождения и определения границ радиационного заражения, уточнения спектрального состава, измерения мощности экспозиционной дозы, приведенной к одному метру над поверхностью земли, а также поиска, обнаружения и определения местоположения точечных источников гамма и нейтронного излучений, отображения и документирования данных радиационной обстановки. Он устанавливается на борту воздушных транспортных средств (самолет, вертолет) без специальной доработки последних. Обеспечивает при полете на высоте 50 – 250 м дистанционное измерение мощности дозы гамма-излучения на высоте 1 м от подстилающей поверхности, обнаружение локальных источников гамма- и нейтронного излучений, регистрацию данных, поступающих с радиовысотомера и аппаратуры топопривязки. Передача данных может осуществляться как через аппаратуру топопривязки и передачи данных так и по УКВ радиосвязи. Результаты разведки выдаются в виде карты полей мощности экспозиционной дозы гамма-излучения на высоте 1 м над поверхностью земли с нанесенными на ней локальными источниками гамма- и нейтронного излучения, протоколов стандартной формы, а также обширной базы данных.

ВКР выполнен в виде отдельных независимых измерительных каналов: спектрометрического канала, обеспечивающего также дистанционное измерение мощности экспозиционной дозы, гамма-обнаружительного канала и нейтронного канала. В состав каждого канала входят: блоки детектирования излучения, контроллеры и табло сигнализации. Обработка информации осуществляется бортовой ЭВМ. Аппаратура дополнена системой топопривязки и каналом передачи данных [4].

Опыт разработки и состав аппаратуры подробно описан в [5], применение и характеристики подробно описаны в [2]. В процессе разработки ВКР обозначилось направление дальнейших исследований, связанное с решением специфических для аппаратуры АРМ вопросов по ее градуировке и разработке алгоритмов обработки спектрометрической информации. К сожалению, эти работы были прерваны в связи с экономическими трудностями и распадом СССР. В дальнейшем некоторые работы в этом направлении были локально продолжены в других проектах ЦНИИ РТК ([14]), часть работ проводилась в инициативном порядке.

Концепция повышения эффективности АРМ

В настоящее время можно сформулировать следующие наиболее актуальные измерительные задачи для разработки современных систем АРМ [3]:

– обнаружение локальных («точечных») источники радиоактивного излучения;

– оценка мощности дозы на высоте 1 метр для распределенных по поверхности Земли источников радиоактивного излучения.

Также можно обозначить дополнительные измерительные задачи, потенциальную возможность эффективного решения которых желательно учитывать при разработке соответствующего обеспечения систем АРМ:

– идентификация радионуклидного состава загрязнения по гамма-спектрам;

– оценка плотность поверхностного загрязнения гамма-излучающими радионуклидами;

– измерение аппаратурных спектров в полете и сохранение этих результатов для последующей обработки в наземном вычислительном центре.

В дальнейшем сосредоточимся на поиске эффективного решения первых двух задач.

В результате обобщения уникального опыта, полученного при разработке мобильных комплексов спектрометрического АРМ, проводимой с учетом результатов ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 г., предложена концепция повышения эффективности АРМ за счет конструктивного использования специфики условий измерений, разработки и применения соответствующих методов математического моделирования и обработки спектрометрической информации, а также эффективной реализации комплексного подхода для увеличения точности и достоверности измерений. Данная концепция была реализована для методов дистанционного обнаружения и определения местоположения локальных источников гамма-излучения и дистанционного измерения мощности дозы гамма-излучения на высоте 1м над поверхностью Земли от радиоактивного загрязнения местности на базе спектрометрических сцинтилляционных блоков детектирования, устанавливаемых на борту летательных аппаратов [1,2,11,12,13].

Применительно к вопросам градуировки аппаратуры АРМ реализация данной концепции подразумевает необходимость разработки специализированного программного средства оптимизированного для решения конечной измерительной задачи и корректно учитывающей условия и специфику процесса измерения. Существенным положительным фактором является то обстоятельство, что при реализации такого специализированного программного средства можно избежать необходимости решения существенно более сложных вопросов, возникающих например, при корректном моделировании процессов переноса и регистрации излучения в лабораторных условий измерения. В частности, нет необходимости создавать развитый графический интерфейс и учитывать сложные процессы переноса заряженных частиц, можно ограничиться простыми и известными моделями взаимодействия гамма-излучения с веществом [3]. В результате грамотного учета специфики решаемой задачи можно получить достаточно эффективное и удобное в работе средство градуировки аппаратуры спектрометрического АРМ, не требующее использования универсальных зарубежных программ моделирования (типа MCNP), и привлечения для своей разработки специалистов слишком высокого уровня.

Цели, задачи и последовательность выполнения работы

В ЦНИИ РТК проводилось исследование и модернизация методов обнаружения локальных источников гамма-излучения и оценки мощности дозы гамма-излучения на высоте 1 метра над поверхностью Земли на базе спектрометрических сцинтилляционных блоков детектирования, размещаемых на борту летательных аппаратов, с целью повышения точности и достоверности результатов измерений и расширения области применения этих методов. Также на базе математического моделирования проводилась разработка эффективных средств проектирования и градуировки измерительных систем, реализующих указанные методы.

Исходя из поставленной цели, необходимо решить **частные задачи исследования**

1. Разработка методов и средств определения необходимых для АРМ характеристик поля гамма-излучения вблизи границы раздела двух полубесконечных сред, типа «воздух – конденсированная среда» на базе математического моделирования.
2. Разработка эффективных методов и средств математического моделирования процессов переноса и регистрации гамма-излучения спектрометрическими блоками детектирования, используемых в АРМ.
3. Обеспечение возможности градуировки аппаратуры АРМ методами математического моделирования для конкретных измерительных задач.
4. Разработка и реализация многоканального спектрометрического метода дистанционного определения мощности дозы поля гамма-излучения.
5. Реализация спектрометрического метода дистанционного обнаружения локальных источников гамма-излучения, использующего временные и спектральные отличия полезного сигнала от фона, применительно к задачам АРМ. Данная реализация базируется на использования оригинального разработанного в ЦНИИ РТК алгоритма обработки спектрометрической информации и соответствующих методов математического моделирования. Также реализация метода информационного анализа и оценки алгоритмов обнаружения источников ионизирующего излучения на базе статического моделирования.

Для достижения указанной цели решаются следующие задачи, определяющие общий порядок действий:

6. Анализ известных, в частности, спектрометрических методов ДРМ, исходя из результатов которого осуществляется выбор и обоснование оптимальных решений и определение возможностей их дальнейшей модернизации, с учетом специфики условий измерения.

7. Выбор набора существенных факторов, физических процессов и их моделей, которые должны быть учтены для решения поставленных измерительных задач.

8. Определение набора требований к конкретным методам, исходя из специфики решаемой задачи, выбор или разработка соответствующего математического метода и реализующего алгоритма, оптимальным образом удовлетворяющего этим требованиям.

9. Определение набора структурных элементов системы программных или экспериментальных средств необходимых для достижения поставленных целей, их функций, взаимосвязи в системе, функциональных и интерфейсных требований к ним.

10. Разработка или приобретение и модернизация необходимых программных или экспериментальных средств с учетом выполнения функциональных и интерфейсных требований, максимальной надежности и удобства эксплуатации.

11. Тестирование разработанных и используемых средств, верификация результатов, оценка их точности или надежности.

12. Реализация разработанных методов в новом поколении аппаратно-программных комплексов АРМ.

13. Теоретическая оценка предельных потенциальных обнаружительных возможностей таких комплексов (при необходимости).

14. Разработка методики проектирования аппаратуры АРМ на базе математического моделирования, позволяющей существенно сократить объем натурных испытаний и сроки создания этой аппаратуры в целом, а также избежать применения дорогостоящих и опасных для здоровья людей и окружающей среды источников радиоактивного излучения.

Ниже приводятся основные достигнутые результаты.

Программный комплекс математического моделирования процессов переноса и регистрации гамма-излучения для разработки систем дистанционного радиационного мониторинга поверхности Земли [1,7,8,9,11,13]

Специалистами ЦНИИ РТК и МИФИ были разработаны математические методы и реализующий их уникальный комплекс специализированных программных средств для получения методами Монте-Карло аппаратурных спектров и характеристик поля гамма-излучения вблизи границы раздела двух полубесконечных сред, типа «воздух – конденсированная среда», необходимых для проектирования и градуировки систем АРМ поверхности Земли [1,7,8,9,11,13]. Разработанные программные средства позволяют учесть широкий диапазон возможных условий измерений, включая геометрии изотропных плоского (бесконечно и равномерно распределённого в горизонтальной плоскости) и локального (в форме эллипса или прямоугольника в горизонтальной плоскости) источников излучения; различные типы заглубления этих источников; различный состав и плотности сред; наличие снежного покрова в форме слоя определенной толщины на границе раздела двух полубесконечных сред и т.д. Использование данного комплекса позволяет повысить точность получаемой информации по сравнению с традиционными экспериментальными методами, отказаться от проведения дорогостоящих натурных испытаний с высокоактивными источниками ионизирующего излучения опасными для здоровья людей и окружающей среды, расширить области применения аппаратуры и проводить градуировку для источников излучения недоступных в современной практике.

В комплекс входят семейство программ GRAIN (GRound-Air INterface) для расчета дифференциальных характеристик поля излучения в области расположения детектора и программа DINAM [13] для расчета аппаратурных спектров применяемых блоков детектирования. При расчете характеристик поля излучения в зависимости от условий используются разнообразные модификации метода Монте-Карло [1,12].

Характерное для решения этого класса задач (размеры детектора малы по сравнению с пробегом излучения в воздухе и расстоянием источник-детектор) применение схемы расчета на основе классической локальной оценки потока дает расходящуюся дисперсию результата, поскольку точка расположения детектора находится в области переноса излучения [1]. В рассматриваемом комплексе

программ используется специально разработанный для таких задач с техмерным источником излучения конечного размера метод псевдолокальной оценки потока излучения для детектора конечных размеров, который для больших расстояний между точкой столкновения и детектором асимптотически совпадает с обычной локальной оценкой потока, при приближении точки столкновения к детектору оценка всегда остается ограниченной и, следовательно, обладает конечной дисперсией [1,7,8].

Ценность результатов работы заключается в том, что созданный комплекс специализированных программных средств отечественной разработки и реализованные в нем математические методы, непосредственно предназначены для решения класса задач, связанных с получением методом Монте-Карло аппаратурных спектров для градуировки систем АРМ поверхности Земли.

Правильность выбранных решений подтверждается практическим опытом использования результатов в разработках систем измерения характеристик поля гамма- излучения вблизи границы раздела двух сред типа «воздух – конденсированная среда», а также результатами их испытаний, сравнением с результатами расчетов, выполненных по другим программам, а также данными, известными по открытой литературе.

Весьма актуальной остается проблема верификации результатов расчетов в условиях острого дефицита однозначно понимаемых экспериментальных данных для дистанционных спектрометрических измерений. Ранее публиковались результаты сравнений для интегральных характеристик поля излучения (мощности поглощенной дозы излучения) [1,8]. В настоящее время проводится сравнение результатов расчетов по различным программам для дистанционных спектрометрических измерений ЦННИ РТК, АТОМТЕХ, ИБРАЭ РАН. Некоторые Результаты представлены на рисунке2, представлены аппаратурные спектры по расчетам программ GRAIN1 + DINAM (ЦНИИ РТК) и MC NP (ИБРАЭ) для детектора NaI (Tl) Ø63×63 мм (АТОМТЕХ), высота измерения 100 м, время измерения 1 с., источник : Cs-137, плоский слой однородный слой с заглублением от 0 до 5 см от поверхности земли, активность 1 Бк/см3, показаны спектры при прохождении излучения через нижний торец и нижний торец и боковую поверхность детектора.

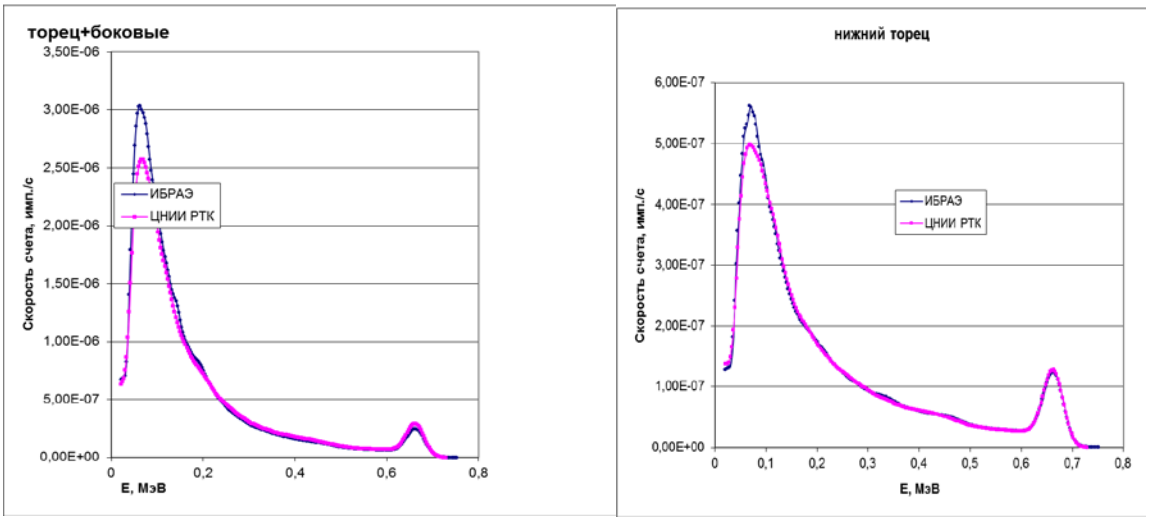


Рисунок 2 – Сравнение результатов расчетов GRAIN1 + DINAM (ЦНИИ РТК) и MC NP (ИБРАЭ) Cs-137, заглубление 5 см, NaI 63×63 мм, высота 100 м

Многоканальный спектрометрический метод дистанционного измерения мощности дозы гамма-излучения [1,14,15]

Целью решения многих задач авиационного радиационного мониторинга Земли является определение мощности дозы излучения на высоте 1 м над земной поверхностью в точках заданного района [1]. Измерение этого параметра авиационными средствами возможно только дистанционно, то есть при наличии значительного удаления воздушного судна с дозиметрической аппаратурой от радиоактивно загрязненной земной поверхности. При дистанционных измерениях точка измерений и точка расположения детектора отстоят друг от друга в пространстве. Между ними находится среда распространения излучения, в которой на излучение действуют различные случайные факторы.

Вследствие этого дистанционное измерение интегральных характеристик гамма-поля по первичным признакам предполагает оценивание измеряемой характеристики на основе дополнительной информации: о среде распространения гамма-излучения, о геометрии измерения, о геометрии источника излучения и др.

Анализ существующих и применяемых в практике авиационного радиационного мониторинга Земли методов получения оценок интегральных характеристик гамма-поля в точке, удаленной от точки детектирования, позволяет классифицировать соответствующие им методы дистанционных измерений. По типу получаемой информации различаю интегральные и спектрометрические методы дистанционных измерений. Интегральные методы основаны на обработке информации о характеристиках потока регистрируемых детектором гамма-фотонов без разделения ее на отдельные энергетические каналы. Примерами детекторов, позволяющих реализовать эти методы, являются ионизационные камеры и газоразрядные счетчики, а также полупроводниковые детекторы, функционирующие в токовом режиме. Спектрометрические методы основаны на обработке спектрометрической информации о потоке гамма-фотонов, получаемой сцинтилляционными или полупроводниковыми детекторами. Спектрометрические методы позволяют получать более точные по сравнению с интегральными методами оценки характеристик гамма-поля на удалении от точки детектирования, так как они обеспечивают более точный учет ослабления гамма-излучения в воздушной среде на основе спектрометрической информации [1,15]. Кроме этого, спектрометрическая информация позволяет с меньшими ошибками определять мощность дозы в точке детектирования, в то время как «интегральным» детекторам присуще свойство «хода жесткости» — зависимости измеренной мощности дозы от спектрального состава излучения.

В ЦНИИ РТК разработан и программно реализован многоканальный спектрометрический метод дистанционного измерения мощности дозы и соответствующий разработанный в ЦНИИ РТК оригинальный математический аппарат для расчетов градировочных характеристик дозиметрической аппаратуры, позволяющий минимизировать погрешность от различий энергетических спектров реально измеряемого и учтенного источника излучения и использовать минимальный объем необходимых исходных данных для градуировки аппаратуры [1,15]. Разработанный метод обладает простотой и удобством при эксплуатации, обеспечивает наглядность представления промежуточных и конечных результатов расчетов градировочных характеристик, что дает возможность применять этот метод широким классом гамма-спектрометров для решения разнообразных дозиметрических задач.

Метод, может быть, применим в экологическом радиационном мониторинге, геологии, геофизике, при ликвидации последствий ядерных аварий. Особенно полезен этот метод может быть в случае необходимости проведения экспрессной оценки радиационной обстановки в районе радиационной аварии или утечки радиоактивных веществ.

Ниже приводится краткое обоснование данного метода.

Существует универсальная не зависящая от спектра источника нагрузочная функция G(E), такая что для фиксированных условий измерений выполняется соотношение [18]:

$$P = \int_0^\infty n(E)G(E)dE \ , \qquad (1)$$

где P – мощность дозы;

$n(E)$ – энергетическая плотность аппаратурного спектра в единицу времени;

$G(E)$ – операторная функция для области расположения детектора.

Рассмотрим задачу оценки МЭД на высоте h = 1 м над поверхностью Земли по результатам измерения аппаратурного спектра на высоте H [1] .

Для дистанционного измерения функция $G^H(E)$ определяется из системы уравнений:

$$\sum_{j=1}^{K} N_{ij}^H G_{jh}^H = P_i^h \ , \qquad (2)$$

где N_{ij}^H – элемент аппаратурной матрицы отклика блока детектирования, расположенного на высоте H, для известным образом распределенного i-го источника гамма-фотонов с энергией E_i,

G_{jh}^{H} – высотный коэффициент «Спектр-Доза» для *j*-го интервала энергетической шкалы спектрометра;

P_i^h – МЭД на высоте *h* (в нашем случае 1м) от поверхности Земли, создаваемая этим источником.

Рассмотрим систему уравнений (2), пусть имеется спектрометр с 1024 энергетическими каналами и 12 измеренных эталонных спектров с соответствующими им значениями доз. Каждый энергетический канал может рассматриваться, как самостоятельный дифференциальный. Ясно, что число каналов здесь заведомо больше, чем число исходных спектров. Метод решения систем (2) , при котором число дифференциальных каналов заведомо больше, чем исходных спектров называется многоканальным.

Запишем (2) в матричном виде для 12 спектров и соответствующих им мощностей доз от различных источников излучения и 1024 энергетических каналов спектрометра:

$$\boldsymbol{N}_H \boldsymbol{G}_h^H = \boldsymbol{P}_h , \tag{3}$$

где $\boldsymbol{N}_H$ – матрица 12×1024 аппаратурных спектров в единицу времени, измеренных на высоте *H*;

$\boldsymbol{G}_h^H$ – вектор (функция) «Спектр-Доза» для высоты расположения детектора *H*;

$\boldsymbol{P}_h$ – вектор мощностей доз от источников с различной энергией излучения на высоте *h* (в данном случае1 м) от поверхности Земли.

Многоканальный метод позволяет за счет связей, накладываемых на возможные решения, получать единственное точное решение для системы линейных уравнений большей размерности, чем число линейно независимых условий.

Критерии хорошей или «корректной» градуировки ***G***:

– для априорных (исходных) спектров результаты применения ***G*** должны давать точное решение;

– в исходных спектрах возможно наличие статистических флуктуаций, небольшие изменения в исходных спектрах в силу статистических флуктуаций или небольших изменений в условиях измерений аппаратурных спектров должны приводить к небольшим изменениям в результатах, (должна обеспечиваться устойчивость решения);

– изменения в энергетическом составе источника излучения должно приводить и к плавному изменению формы аппаратурного спектра и значению МЭД, что должно быть учтено в форме ***G***.

Второе условие означает отсутствие осцилляций в ***G***, третье – ее гладкость.

Запишем (3) в матричном виде, для наглядности опустив коэффициенты:

$$\boldsymbol{NG} = \boldsymbol{P} , \tag{4}$$

где ***N*** – аппаратурная матрица 12×1024;

G – вектор (функция) «Спектр-Доза»;

P – вектор доз от источников с различной энергией излучения

Помножив левую и правую части (4) слева на транспонированную матрицу $\boldsymbol{B}^T$, получим:

$$\boldsymbol{N}^T \boldsymbol{NG} = \boldsymbol{N}^T \boldsymbol{P} , \tag{5}$$

Откуда

$$\boldsymbol{G} = (\boldsymbol{N}^T \boldsymbol{N})^{-1} \boldsymbol{N}^T \boldsymbol{P} . \tag{6}$$

Для 1024 степеней свободы имеем 12 связей. Из всех возможных точных решений нужно выбрать оптимальное в смысле математического выражения некоторых критериев, отражающих наши представления о физическом смысле исходных данных и получаемого решения. Для выбора оптимального решения многоканального метода следует корректно учесть статистического характера входных данных для экспериментально полученных спектров, а также общие свойства функции «Спектр-Доза» (1), исходя из анализа ее физического смысла, что должно быть выражено в выборе соответствующего математического аппарата [1].

Легко проверить путем подстановки, что

$$\boldsymbol{G} = \boldsymbol{N}^T(\boldsymbol{N}\boldsymbol{N}^T)^{-1}\boldsymbol{P} \tag{7}$$

также является решением системы уравнений (4).

Решением системы (4) будет также

$$\boldsymbol{G}_s = \boldsymbol{N}_s^T(\boldsymbol{N}\boldsymbol{N}_s^T)^{-1}\boldsymbol{P}, \tag{8}$$

где $\boldsymbol{N}_s$ – матрица, полученная путем сглаживания (фильтрации) строк (спектров) матрицы $\boldsymbol{N}$

В данном случае применяется специально подобранный информационный фильтр. Для получения гладкой формы искомой функции используется сглаживание — двойное скользящее осреднение с шириной интервала, равной приблизительно шагу энергетической шкалы [1].

Результаты программной реализации указанного метода ЦНИИ РИТК приведены на рисунке3.

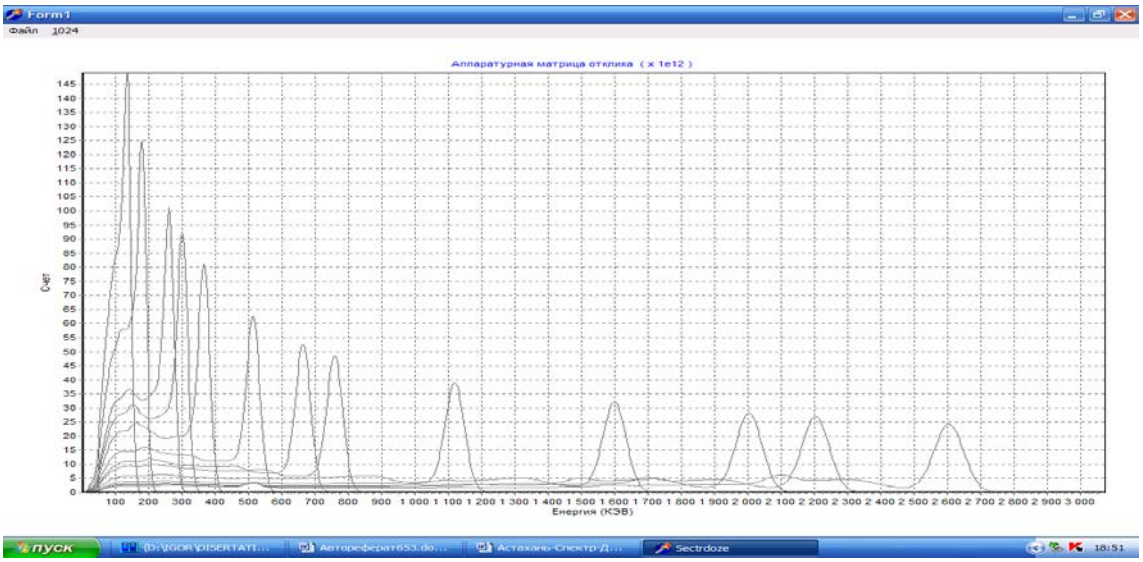


Рисунок 3а – Вид окна программы с нормированными на величину МПД на высоте 1м исходными аппаратурными спектрами, измеренными на высоте полета 50м от бесконечного повехностного источника, детектор NaI Ø150×63 мм [1]

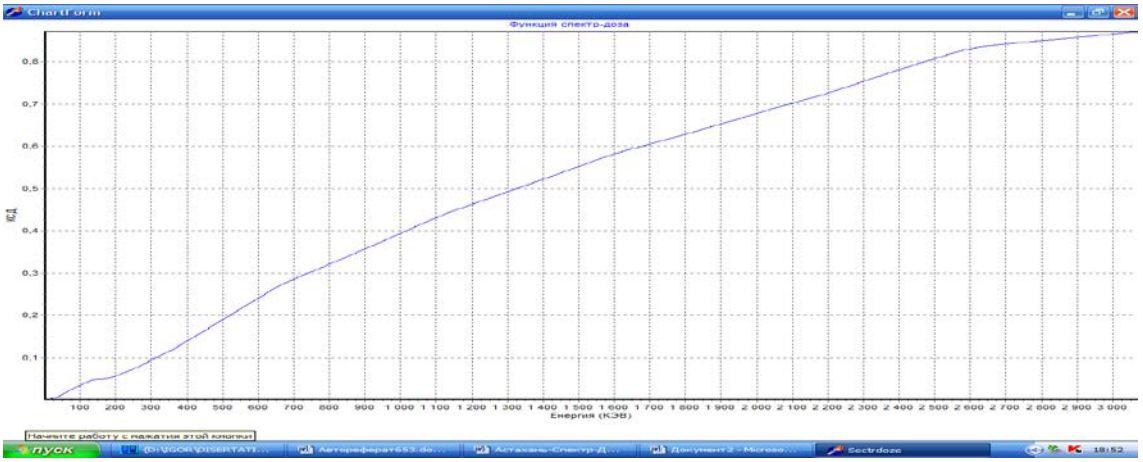


Рисунок 3б – Вид окна программы с соответствующими им коэффициентами Спектр-Доза

Метод дистанционного обнаружения локальных источников ионизирующего излучения, использующего временные и спектральные отличия полезного сигнала от фона. Оценка потенциальных обнаружительных возможностей систем АРМ [1,14]

Локальными («точечными») источниками радиоактивного излучения называют такие источники, что в процессе измерения характеристик поля излучения их собственными линейными размерами в любом случае можно пренебречь. В общем случае задача состоит в том, чтобы по измеренным спектрам определять с вероятностью не ниже заданного порогового уровня факт наличия в полосе

поиска аппаратуры АРМ источника ионизирующего излучения с заданной активностью и известным спектром излучения, также его местоположение, при этом избегая ложных обнаружений за счет статистических флуктуаций естественного фона.

Разработан метод дистанционного обнаружения локальных источников ионизирующего излучения, использующего временные и спектральные отличия полезного сигнала от фона на основе применения разработанного в ЦНИИ РТК оригинального алгоритма обработки спектрометрической информации [1] и математического моделирования полезного сигнала, позволяет максимально повысить обнаружительные способности аппаратуры для различных условий применения, обеспечивает удобство проведения градуировки и оценки предельных потенциальных обнаружительных возможностей аппаратуры методом математического моделирования.

Вообще поиск источников ионизирующего излучения в настоящее время приобрел особую актуальность. Дело в том, что различные территории городов и населенных пунктов, особенно свалки загрязнены выброшенными либо утерянными закрытыми радионуклидными источниками, жидкими и порошковыми радиоактивными отходами, ломом различных прибо-ров, в которых использовался радиоактивный светосостав постоянного действия. Не следует забывать и о существующей вероятности воровства радиоактивных веществ террористическими организациями, которые также несут угрозу обществу. Все это повышает важность решения задач по поиску источников ионизирующего излучения и пресечению их нелегального перемещения. Падение в 1978 году в Канаде советского спутника «Космос-954» с ядерной энергетической установкой на борту, в результате чего произошло разрешение установки и разброс обломков активной зоны по большой территории, еще более обострило актуальность проблемы радиационной безопасности и защиты экологического пространства. Еще одну страницу в истории развития АРМ следует связать с поиском источников радиоактивных загрязнений на территориях вследствие применения в региональных войнах боеприпасов, содержащих обедненный уран.

Детальное описание математических основ процесса обнаружения сигнала источника излучения на фоне помехи для мобильных комплексов радиационного контроля в рамках прикладной статистики приведено в сборнике [17], там же приведены оригинальные алгоритмы обнаружения УрФУ, (учитывающие, к сожалению, только временные отличия).

Для обнаружения сигнала источника излучения на фоне помехи можно воспользоваться различиями во временных и спектральных характеристиках полезного сигнала и фона [1]. На рисунке 4 приведены примеры временной характеристики полезного сигнала, и спектральные характеристики полезного и фонового сигналов (в соответствующих окнах программы ЦНИИ РТК для оценки алгоритмов обнаружения).

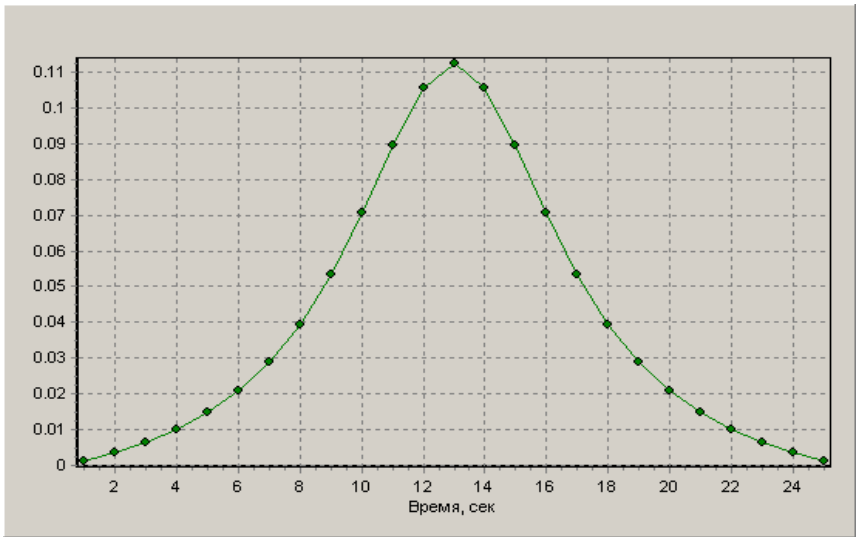


Рисунок 4а – Нормированная временная характеристика полезного сигнала μ

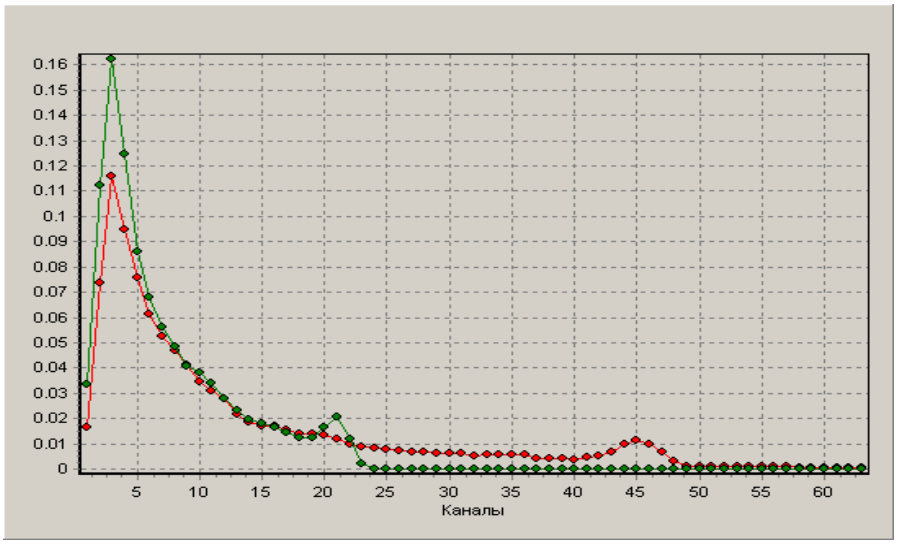


Рисунок 4б – Нормированные спектральные характеристики полезного и фонового сигналов ν

Определим временное окно как интервал времени, в течении которого мы можем принимать существенный полезный сигнал от источника излучения, согласно рис. 4а его продолжительность составляет 25 сек., за это время делается 25 измерений спектров по 1 сек. Очевидно, положение источника соответствует 13 измерению, расположенному в середине временного окна.

Для реализации алгоритма фильтрации полезного сигнала на фоне помехи построим следующую статистику:

$$X = \sum_{j=1}^{K} \sum_{i=1}^{N} \frac{\mu_j^c}{\mu_j^\phi} \frac{\nu_i^c}{\nu_i^\phi} n_{ij}\,, \tag{9}$$

где K – величина временного окна, в котором проводится скользящее суммирование (количество измеренных спектров при прохождении временного окна или количество временных интервалов, на которое разделено это окно),

N – количество энергетических каналов гамма-детектора,

μ_j^c – временная характеристика полезного сигнала,

μ_j^Φ – временная характеристика фона

ν_i^c – спектральная плотность полезного сигнала,

ν_i^ϕ – спектральная плотность фонового сигнала,

n_{ij} – счет в i–ом энергетическом канале в j–ый интервал времени временного окна.

Данная статистика в наиболее общем виде выражает идею использования различиями во временных и спектральных характеристиках полезного сигнала и фона, для эффективного обнаружения источника. В общем случае такая статистика должна иметь локальный максимум, когда центр временного окна располагается над источником. Таким образом, можно определить факт его наличия и местоположение.

При измерении в природных средах характеристики фона обычно считаются стационарными ($\mu_j^\Phi = 1$), но дополнительно может учитываться зависимость спектральных характеристик полезного сигнала от расстояния от времени измерения. Характеристики полезного сигнала в момент измерения зависят от высоты полета, удаления детектора от источника, конструкции, индивидуальных характеристик и расположения детектора, также от энергетического спектра источника излучения. Вопрос о получении этих характеристик эффективно решается с помощью описанного выше программного комплекса для градуировки систем АРМ. Используются программы GRAIN3 и DINAM для расчета характеристик поля и соответствующих аппаратурных спектров.

Для реализации решающего правила воспользуемся движком, который вычисляется путем скользящего суммирования во временном окне на всем протяжении движения:

$$\sum_{j=1}^{K}\sum_{i=1}^{N}\mu_j^c\frac{\nu_{ij}^c}{\nu_i^\phi}n_{ij}\geq C \qquad (10)$$

где ν_{ij}^c – нормированная спектральная плотность полезного сигнала с учетом времени измерения,

C – порог обнаружения.

Порог обнаружения выбирается из соображений величины допустимого уровня «ложных тревог», т.е. частоты ложных срабатываний при отсутствии источника за счет статистических флуктуаций фона. В случае, когда фон представляет собой стационарный процесс, т.е. когда интенсивность не изменяется со временем(μ_j^ϕ=1), порог можно определять по следующему соотношению:

$$C=\lambda_\phi T+\alpha\sqrt{\lambda_\phi T}\,, \qquad (11)$$

где λ_ϕ – интенсивность фона,

T – время измерения (длительность временного окна),

α – количество «сигм» в пороге обнаружения.

В ЦНИИ РТК также разработан и программно реализован метод информационного анализа и оценки алгоритмов обнаружения источников ионизирующего излучения на базе статического моделирования [14]. С его помощью проводится исследование и тестирование оригинального алгоритма обнаружения, учитывающего временные и спектральные отличия полезного сигнала от фона применительно к различным условиям измерения.

Программное обеспечение для информационного анализа и отработки алгоритмов обнаружения источников радиационного излучения предназначено для моделирования процессов поиска источника излучения детекторами гамма-излучения, установленными на подвижном объекте (при проведении наземного или воздушного поиска) и позволяет решить следующие задачи:

Произвести оценку минимальной активности детектируемых источников излучения при заданной минимальной вероятности обнаружении и выбранном уровне ложных тревог [17].

Произвести оценку возможности обнаружения источников излучения с заданной активностью.

Программное обеспечение предусматривает ввод экспериментальных или расчетных данных для задания модели полезного сигналов и фона, позволяет учесть критерии обнаружения (вероятности обнаружения и уровня ложных тревог[17]), позволяет оценивать различные способы обнаружения (например, учитывать только временные или только спектральные отличия полезного сигнала от источника и фона) [1].

Применение результатов работы

Результаты работы апробированы и использованы при разработке аппаратно-программных комплексов АРМ поверхности Земли и в других комплексах радиационного контроля ЦНИИ РТК, в том числе при проектировании и градуировке аппаратуры контроля радиационной обстановки для бортового вертолетного комплекса оперативного экологического контроля «Астрахань» (2007 г.). Комплекс предназначен для контроля дистанционным методом с вертолета МИ-8МТВ состояния радиационной обстановки на облетаемых территориях военных объектов и в зонах их ответственности для обеспечения служб военных округов оперативными данными для принятия решений. Комплекс прошел государственные приемо-сдаточные испытания (в том числе летные), получены положительные результаты. [13]

Заключение

В заключении сформулируем основные результаты проведенных исследований:

1. Разработана концепция повышения эффективности АРМ и процесса проектирования реализующих его измерительных систем за счет конструктивного использования специфики условий измерений, разработки и применения соответствующих методов математического моделирования и обработки спектрометрической информации, данная концепция реализована для методов дистанционного обнаружения локальных источников гамма-излучения и дистанционного измерения

мощности дозы гамма-излучения от радиоактивного загрязнения местности на базе многоканальных спектрометрических сцинтилляционных блоков детектирования.

2. Разработаны методы и средства градуировки аппаратуры АРМ на базе компьютерных моделей, позволяющие повысить точность получаемой информации по сравнению с традиционными экспериментальными методами, отказаться от проведения дорогостоящих натурных испытаний с высокоактивными источниками ионизирующего излучения опасного для здоровья людей и окружающей среды, расширить области применения аппаратуры и проводить градуировку для источников излучения, недоступных в современной практике.

3. Разработан многоканальный спектрометрический метод дистанционного измерения мощности дозы, позволяющий минимизировать погрешность от различий энергетических спектров реально измеряемого и учтенного источника излучения и использовать минимальный объем необходимых исходных данных для градуировки аппаратуры.

4. Реализован метод дистанционного обнаружения источников ионизирующего излучения, использующего временные и спектральные отличия полезного сигнала от фона на основе применения разработанного в ЦНИИ РТК оригинального алгоритма обработки спектрометрической информации и математического моделирования полезного сигнала.

5. Результаты работы апробированы и использованы в аппаратно-программных комплексах ДРМ и в других комплексах радиационного контроля ЦНИИ РТК.

1. Сухоруков А.И., Хисматов И.Ф., Новиков И.Э. Основы теории аэрокосмического радиационного мониторинга Земли. Ч. 1. Физические основы радиационного дистанционного зондирования Земли. М.: Изд-во ВУНЦ ВВС «ВВА им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», 2011. 312 с.
2. Э.Н. Бакин Э.Н., Копаев В.И., Кудряшов А.С. Проблемные вопросы и перспективы развития системы воздушной радиационной, химической и биологической разведки местности и воздушного пространства [Электронный ресурс] //Электронное периодическое издание рецензируемый военно-научный журнал «Воздушно-космические силы. Теория и практика» № 2, июнь 2017 С. 7-17. URL: http://vva.mil.ru/upload/site21/qFTBOpKEwc.pdf (дата обращения 01.08.2017).
3. Кожемякин В.А., Полищук В.П. Интеллектуальные датчики радиации для малоразмерных беспилотных систем 7-я Международная научная конференция по военно-техническим проблемам, проблемам обороны и безопасности, использованию технологий двойного применения (Минск, 20–22 мая 2017 г.) : сборник научных статей. В 3 ч. Ч. 1 / Государственный военно-промышленный комитет Республики Беларусь. — Минск : Четыре четверти, 2017. — 404 с С.164-173
4. Методика и некоторые результаты авиационной гамма-съемки радиоактивного загрязнения территории европейской части России / под ред. Ш.Д. Фридмана, А.Н. Пегоева. – СПб. : Гидрометеоиздат, 1994.
5. К. т. н. Беляев А. Н., Демченков В. П.,. Пярсинен А. Я Комплекс аппаратных средств воздушного и наземного поиска источников ионизирующих излучений и радиационной разведки / Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. - М.: НТЦ «Информтехника». - 2003. - Вып. 9 – 10 С.13-16.
6. Ерицян Р.К., Эльяшевич В.Д. Современные средства радиационной, химической и биологической защиты войск РХБ защиты российской федерации // Проблемы и перспективы развития вооружения и средств радиационной, химической и биологической защиты Вооруженных Сил Республики Беларусь: сб. тез. докл. Респ. науч.-практ. конф., Минск, 26 нояб. 2014 г. / под общ. ред. Казакова Д.О.; редкол.: Петруша С. Н. [и др.] – Минск: Изд. центр БГУ, 2014. С64-67.
7. Новиков И.Э. Пакет программ математического моделирования процессов переноса и регистрации гамма-излучения систем авиационного радиационного мониторинга // Научно-технический и производственный журнал "Вестник компьютерных и информационных технологий" № 8, 2013 С.16-21.
8. Новиков И.Э. Программный комплекс математического моделирования процессов переноса и регистрации гамма-излучения для разработки систем дистанционного радиационного мониторинга поверхности Земли. // Труды Международной научно-технической конференции «ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ РОБОТОТЕХНИКА» 24-25 ноября 2016, Санкт-Петербург. С.441-446.
9. Новиков И.Э. Пакет программ математического моделирования процессов переноса и регистрации гамма-излучения для разработки систем авиационного радиационного мониторинга поверхности

Земли» автора Новикова И.Э. // Тезисы докладов XIII-го международного Совещания «Проблемы прикладной спектрометрии и радиометрии», проводимого 5-8 октября 2015 г. в г. Санкт-Петербург С.149-152.
10. Распространение ионизирующих излучений в воздухе / В.А. Климанов и др.; под ред. В.И. Кухтевича и В.П. Машковича. М.: Атомиздат, 1979. 216 с
11. И.Э. Новиков Пакет программ для моделирования процессов переноса и регистрации гамма-излучения для авиационного радиационного мониторинга с помощью беспилотных летательных аппаратов. // Сборник докладов Международной научно-технической конференции «ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ РОБОТОТЕХНИКА» 23-25 ноября 2011, Санкт-Петербург.
12. Панин М.П. Моделирование переноса излучения. М.: МИФИ, 2008. 212 с
13. Свидетельство № 2010610416 о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программа для имитационного моделирования систем детектирования гамма-излучения DINAM / Новиков И.Э. (РФ); заявлено 02.11.2009; зарегистр. в реестре программ для ЭВМ 11.01.2010.
14. Власенко А.Н., Лапин О.Е., Новиков И.Э**.** «Решение прямой и обратной задачи сцинтилляционной гамма-спектрометрии для дистанционного измерения характеристик поля излучения источника, образованного техногенными радионуклидам» Труды 7-го международного симпозиума «Экстремальная робототехника – робототехника для работы в условиях опасной окружающей среды» (2-3 октября 2013 года, Санкт-Петербург). С. 523-530.
15. Новиков И.Э Коган Л.Б. Многоканальный спектрометрический метод дистанционного измерения мощности дозы. //Сборник трудов Международной научно-технической конференции «ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ РОБОТОТЕХНИКА-2012 » 25-26 апреля 2012.
16. Богатов С.А., Шведов А.М. Обработка спектральных данных аэрогамма съемки с использованием методов решения некорректных задач. Аппаратура и новости радиационных измерений, №3 (70), 2011, сс 55-61
17. Мобильные комплексы радиационного контроля. Сборник научных разработок. /Под ред. профессоров Б.В.Шульгина и А.В.Кружалова. Екатеринбург. УрФУ. 2011, 137 с
18. Лукашевич Р.В., Фоков Г.А. Применение спектрометрического метода расчета мощности дозы для создания высокочувствительных образцовых средств измерения на базе сцинтилляционных блоков детектирования //Приборы и методы измерений 2017. – Т. 8, № 3. – С. 246–253
19. Коган Р.М., Назаров И.М., Фридман Ш.Д. Основы гамма-спектрометрии природных сред. 3-е изд. М.: Энергоатомиздат, 1991. 232 с.
20. Чернобыль: радиоактивное загрязнение природных сред / Ю.А. Израэль и др.; под ред. Ю.А. Израэля. Л.: Гидрометеоиздат, 1990. 295 с.
21. Израэль Ю.А. Радиоактивные выпадения после ядерных взрывов и аварий / Ю.А. Израэль. – СПб. : Прогресс-погода. 1996. – 355 с.
22. Тихонов М.Н., Петров Э.Л Ядерное приборостроение: вехи большого пути АНРИ №1 (48), 2007, с.54-62.
23. Бахур А.Е. Перспективы использования БПЛА в радиоэкологии и при поисковых геологоразведочных работах / А.Е. Бахур, А.В. Стародубов // АНРИ. –2016**.** – №3. – С. 2–8**.**

V.V. Arykantsev, A.A. Goncharov, V.V. Chernyshev

MODELING OF CONTACT INTERACTION OF WALKING MOVER SUPPORT ELEMENTS (FEET) WITH THE GROUND UNDER CONDITIONS OF COMPLEX LOADING

Volgograd State Technical University
dtm@vstu.ru

Abstract

In the paper discussed results of ground stressed state research under impact of walking mover feet. Modeling of contact mechanic of walking mover foot with ground performed through software of engineering simulation ANSYS. Were formed dimensional contact task for solid foot, interacted with unsmooth support surface – inhomogeneous half-space, where viscoelastic behavior of materials described in form of nonlinear function between deformations and stresses, also as schematized diagram of viscoelastic materials. The task solved in condition of traction force existence in contact squares, defined on Amontons law, in additional condition of complex load by external forces, focused in foot joint – normal forces, which forms contact squares and tangential forces, which triggers slippage. Investigated feet of different shapes. Results of the work can be demand in engineering of walking rovers and planet research vehicles.

Key words: mobile robots, walking mover, interaction with ground, contact interaction, mathematical modeling, real tests.

В.В. Арыканцев, А.А. Гончаров, В.В. Чернышев

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ОПОРНЫХ Э ЛЕМЕНТОВ (СТОП) ШАГАЮЩЕГО ДВИЖИТЕЛЯ С ГРУНТОМ В УСЛОВИЯХ СЛОЖНОГО НАГРУЖЕНИЯ

Волгоградский государственный технический университет
dtm@vstu.ru

Аннотация

В работе обсуждаются результаты исследований напряженного состояния грунта под воздействием стоп шагающего движителя. Моделирование механики контакта стопы шагающего движителя с грунтом проводилось при помощи пакета конечно-элементного моделирования ANSYS. Сформулирована пространственная контактная задача для жесткой стопы, взаимодействующей с шероховатой опорной поверхностью – неоднородным полупространством, упругопластическое поведение материалов которого задается в виде нелинейных зависимостей между деформациями и напряжениями, а также схематизированных диаграмм упругопластических материалов. Задача решалась при наличии сил линейного трения в областях контакта, определяемых в рамках закона Амонтона, в условиях сложного нагружения внешними силами, приведенными к шарниру стопы – нормальными силами, формирующими области контакта и касательными силами, инициирующими скольжение. Исследованы стопы различных форм. Результаты работы могут быть востребованы при проектировании шагающих роверов и планетоходов.

Ключевые слова: мобильные роботы, шагающий движитель, взаимодействие с грунтом, контактное взаимодействие, математическое моделирование, натурные эксперименты.

Освоение планет предполагает проведение грунтовых работ. Эти работы требуют значительных тяговых усилий. Максимальная тяга, реализуемая на грунте колесными и гусеничными машинами, пропорциональна весу машины. В условиях ослабленной гравитации для обеспечения требуемого тягового усилия необходимо увеличение массы машин. Аналогичные проблемы имеют место и у машин, передвигающихся по дну (подводных бульдозеров, кабелеукладчиков, самоходных добычных модулей и др.). В этом случае дефицит сцепного веса обусловлен наличием сил Архимеда. При

дефиците сцепного веса шагающие роботы могут быть эффективнее колесных и гусеничных машин. Они обладают более высокой грунтовой и профильной проходимостью, тяговые свойства шагающих машин также выше [1-3]. Для традиционных транспортных средств (рис. 1 а) сила тяги равна $F_{тяги} = F_{сцепл.} - F_{сопр.}$, где $F_{сцепл.}$ и $F_{сопр.}$ — сила сцепления и сила сопротивления движению со стороны грунта, соответственно. Сила сцепления $F_{сцепл.} = k_{\varphi} N$ и сила сопротивления движению $F_{сопр.} = k_f N$ пропорциональны нормальной реакции грунта N [4]. На слабонесущих грунтах соотношение коэффициентов сцепления k_{φ} и сопротивления движению k_f у колесных и гусеничных машин таково, что они не могут реализовать значительных тяговых усилий. Коэффициент сцепления на слабонесущих грунтах у колесных и гусеничных машин составляет, как правило, не более 0,2–0,3, а коэффициент сопротивления движению лежит в пределах 0,1–0,2 [4, 5]. Поэтому на слабых грунтах реализуемое тяговое усилие составляет не более 10–20% от веса машины. При движении нужен определенный запас тяги для преодоления уклонов. В результате, колесные и гусеничные машины могут двигаться в условиях слабого грунта лишь на пределе сцепления. Шагающий движитель может обеспечить более высокие тягово-сцепные свойства. Для шагающих машин, в отличие от колесных и гусеничных, грунт не является препятствием для передвижения, а лишь требует необходимых затрат мощности на его прессование [4-6]. Сила тяги у шагающих машин (рис. 1 б) равна силе сцепления $F_{тяги} = F_{сцепл.}$ Кроме того, коэффициент сцепления для шагающих машин может быть >>1. Очевидно, если нога глубоко завязла в грунте, то можно реализовать значительную горизонтальную силу тяги.

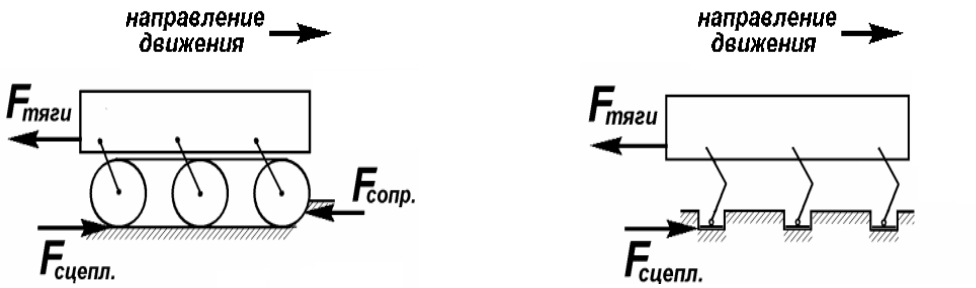


Рисунок 1 — Силы действующие на колесную или гусеничную (а) и шагающую (б) машину

Тяговые испытания шагающего робота «Восьминог» (рис. 2) и шагающего аппарата (модульного аппаратного комплекса) МАК–1 (рис. 2), разработанных в Волгоградском государственном техническом университете, подтверждают превосходство шагающих машин по тяговым свойствам, грунтовой и профильной проходимости, в сравнении с гусеничными и колесными машинами [1-3]. Вместе с тем, испытания показали, что тягово-сцепные свойства шагающих машин существенно зависят от от формы и размера стопы и напряженно-деформированного состояния грунта под стопами [7]. В работе обсуждаются результаты математического моделирования контактного взаимодействия стопы шагающего движителя с деформируемыми грунтами.

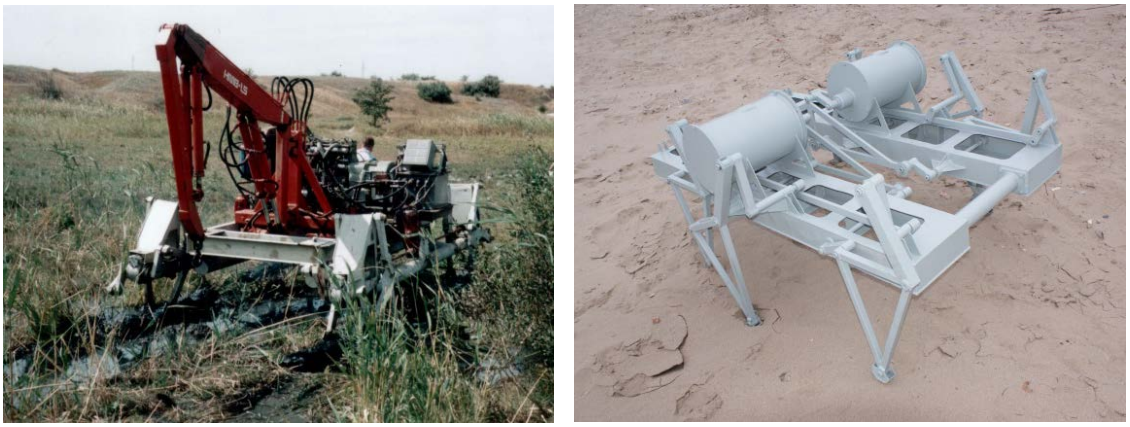


Рисунок 2 — Испытания шагающего робота «Восьминог» (а) и МАК-1 (б) на слабонесущих грунтах

При моделировании процесс взаимодействия шагающего движителя с грунтом подразделялся на фазу смены стоп и фазу реализации тягового усилия. В фазе реализации тягового усилия контакт стопы с опорной поверхностью считался квазистатическим, так как возникающие при смене стоп колебания на слабонесущих грунтах быстро затухают [8-10]. Использовался упругопластический подход к решению задачи механики контактного взаимодействия стопы с грунтом. Он основывается на раздельном описании упругих и пластических деформаций различными физическими зависимостями. В этом подходе можно выделить различные варианты упругопластического течения. В соответствии с известными теориями пластического течения для упругопластических решений механики грунтов характерно использование дифференциальных зависимостей между напряжениями и деформациями (пластическими и полными) и процедуры пошагового нагружения грунтовых массивов согласно очередности приложения и изменения внешних нагрузок. В процессе решения ищется граница, разделяющая области упругого и предельного равновесия. В такой постановке задача может быть решена только с помощью численных методов, из числа которых наиболее перспективным является метод конечных элементов [11].

Моделирование контактного взаимодействия стопы с грунтом в фазе реализации тягового усилия было выполнено при помощи пакета конечно-элементного моделирования ANSYS, предназначенного для решения линейных и нелинейных задач механики деформируемого твёрдого тела, включая задачи контактного взаимодействия. Была сформулирована пространственная контактная задача для жестких стоп различной формы, взаимодействующих с шероховатей опорной поверхностью — неоднородным полупространством, упругопластическое поведение материалов которого задается в виде линейных или нелинейных зависимостей между деформациями и напряжениями, а также материальными константами упругопластических материалов (рис. 3). Задача решалась в условиях простого нормального и сложного нагружения, создаваемого нормальными N и касательными F внешними силами приведенными к шарниру стопы, при допущении идеального сопряжения контактирующих тел и наличия сил линейного трения в области контакта. Варьировались размер и форма стопы, а также упругие свойства грунта (E = 0,5–50 МПа) и среднее давление (q = 0,01–0,10 МПа) стопы на грунт. На рис. 4 и 5–12 показаны разработанные в системе ANSYS твердотельные модели лыжеобразной и круглой стопы, а также некоторые характеристики напряженно-деформированного состояния линейно упругого грунта, упругие свойства которого задавались модулем Юнга и коэффициентом Пуассона.

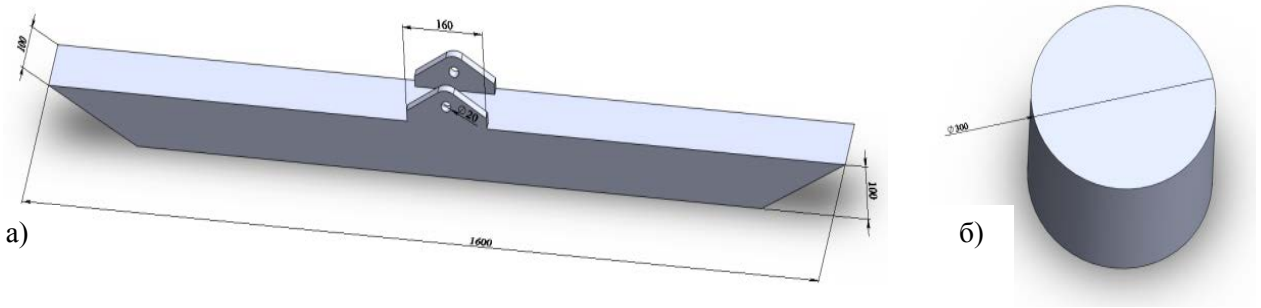


Рисунок 3 — Твердотельная модель лыжеобразной (а) и круглой (б) стопы

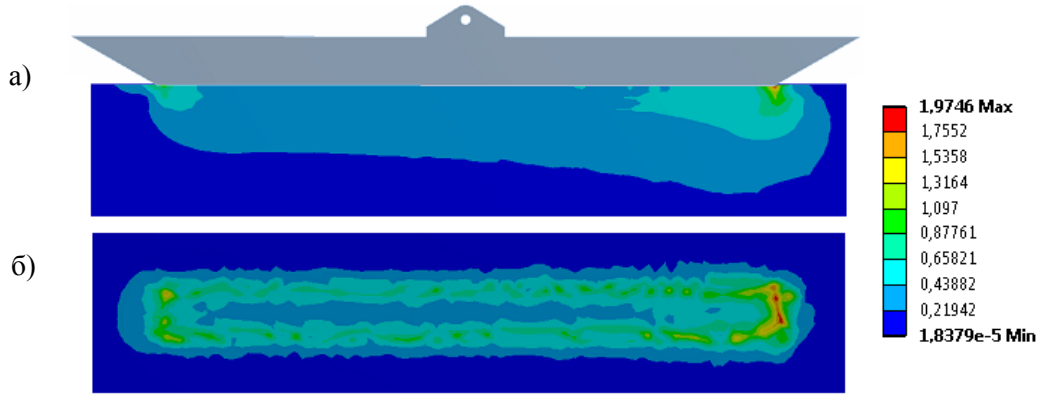


Рисунок 4 — Распределения эквивалентных грунтовых напряжений по Мизесу (в МПа) под лыжеобразной стопой (размером 1,6×0,1 м) при действии нормальной (N = 10 кН) и сдвигающей нагрузки (F = 8 кН): в вертикальном сечении (а) и на виде сверху (б)

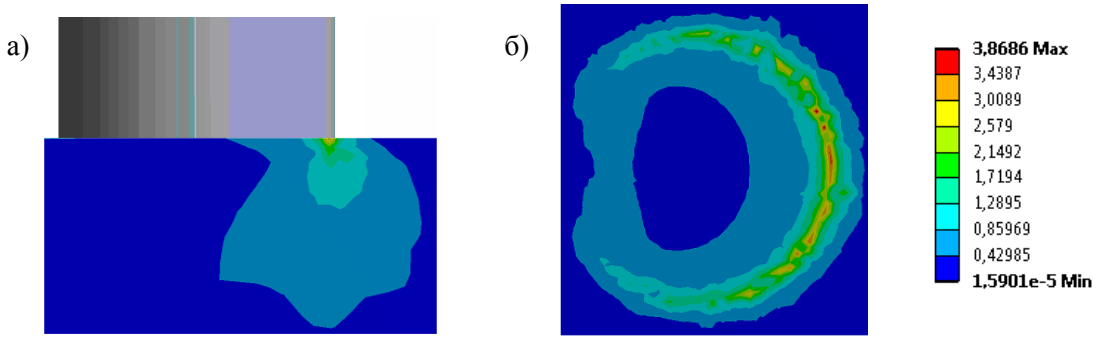


Рисунок 5 — Распределения эквивалентных грунтовых напряжений по Мизесу (в МПа) под круглой стопой (диаметром 0,3 м) при действии нормальной (N = 10 кН) и сдвигающей нагрузки (F = 8 кН): в вертикальном сечении (а) и на виде сверху (б)

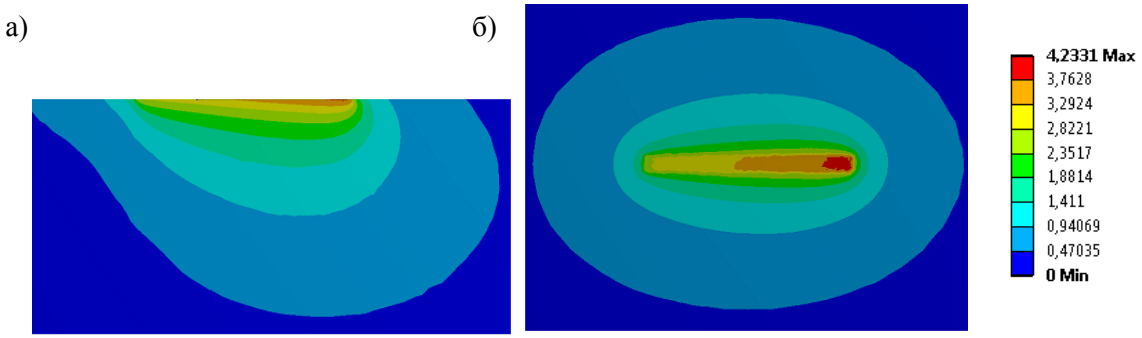


Рисунок 6 — Распределение полных деформаций грунта (мм) под лыжеобразной стопой при действии нормальной (N=10 кН) и сдвигающей нагрузки (F=8 кН): вертикальное сечение (а), вид сверху (б)

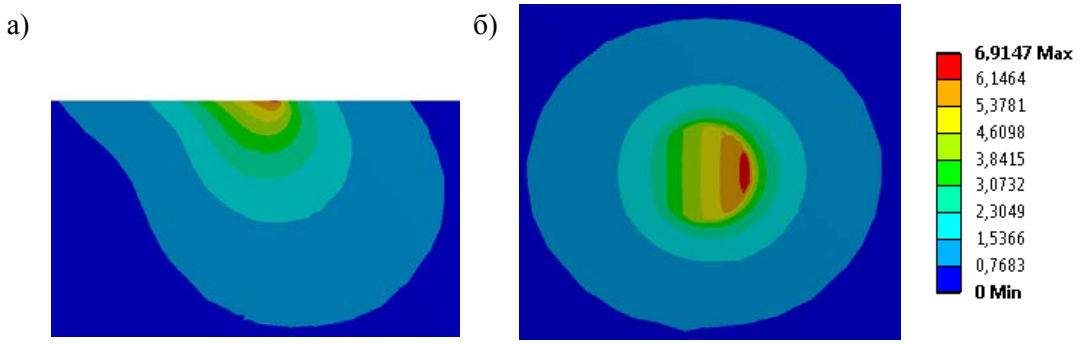
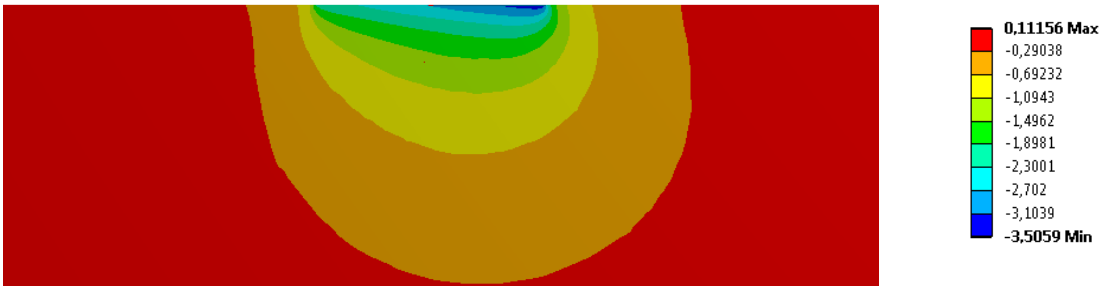
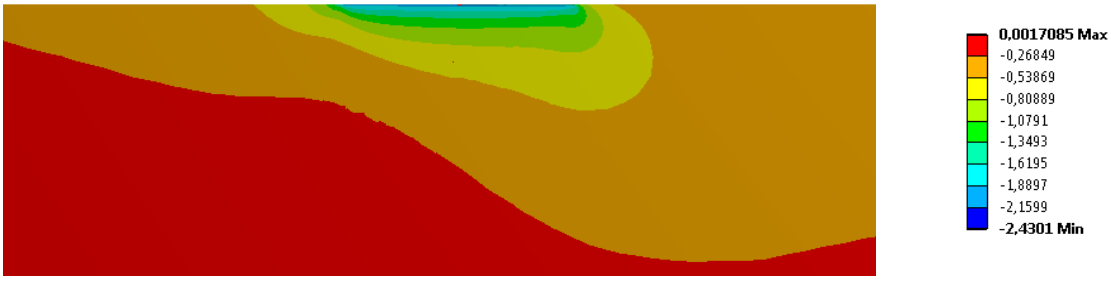


Рисунок 7 — Распределение полных деформаций грунта (мм) под круглой стопой при действии нормальной (N=10 кН) и сдвигающей нагрузки (F=8 кН): вертикальное сечение (а), вид сверху (б)

а)



б)



в)

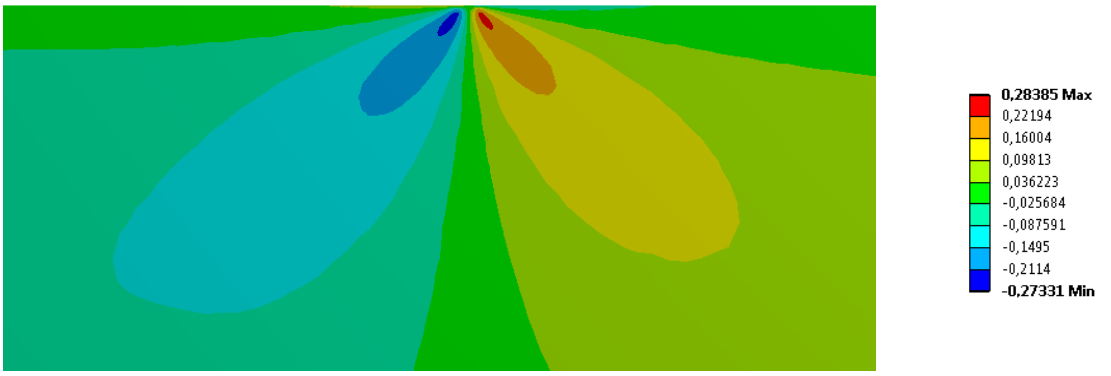


Рисунок 8 — Распределение вертикальных (а), продольных (б) и поперечных (в) деформаций грунта (мм) под лыжеобразной стопой при нормальной (N=10 кН) и сдвигающей нагрузки (F=8 кН)

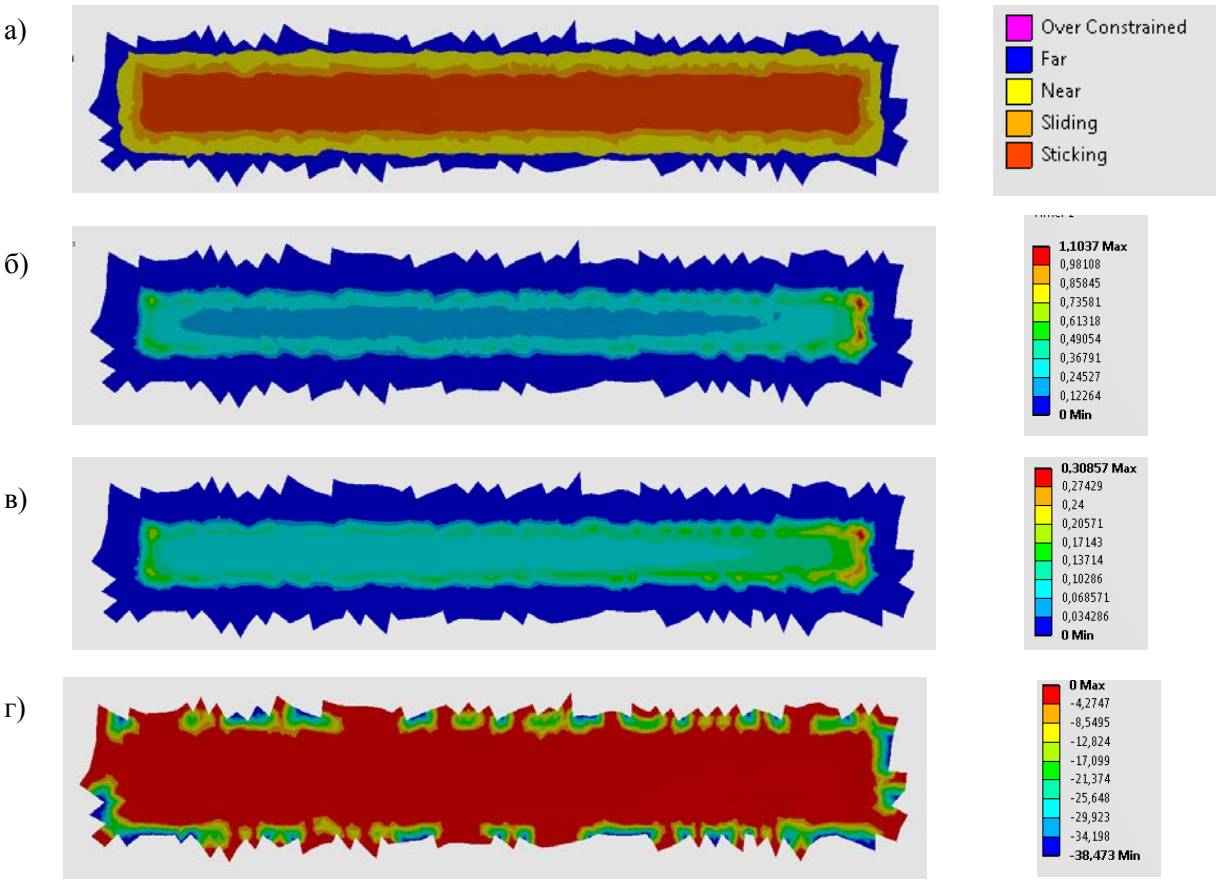


Рисунок 9 — Характеристики контакта под лыжеобразной стопой при действии нормальной (N=10 кН) и сдвигающей нагрузки (F = 8 кН): статус контакта (а); распределение сил трения (б); распределение нормального давления (в); распределение зазора (г)

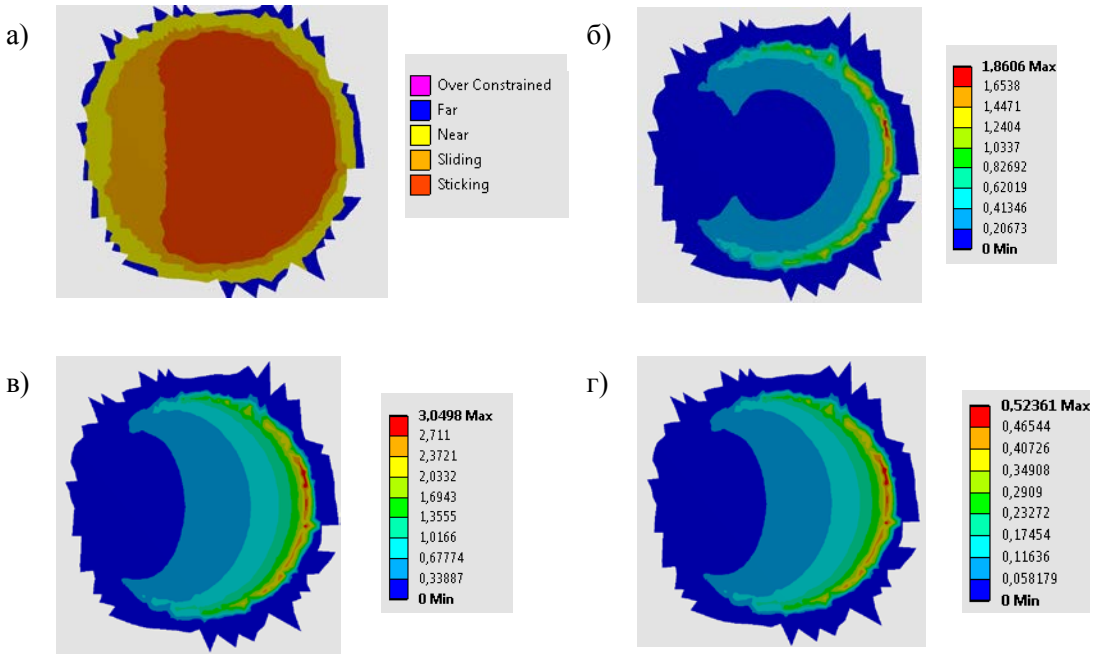


Рисунок 10 — Характеристики контакта под круглой стопой при действии нормальной нагрузки (q = 0,08 МПа, E = 5 МПа): статус контакта (а); распределение сил трения (б); распределение нормального давления (в); распределение зазора (г)

Результаты математического моделирования контактного взаимодействия показали, что при взаимодействии жесткой стопы с деформируемой опорной поверхностью задействован достаточно большой объем грунта. Грунтовые напряжения распределены под опорной поверхностью стопы неравномерно. Имеются участки с локальными экстремальными значениями. При простом нормальном нагружении лыжеобразной стопы грунт по периметру опорной поверхности нагружен больше, чем в середине стопы, а наибольшие значения напряжений находятся по краям лыжи на глубине 0,1–0,2 м от поверхности. Похожая ситуация имеет место и у круглой стопы — наибольшие напряжения сконцентрированы по окружности у края стопы. Приложение касательной силы к шарниру стопы приводит к перераспределению напряжений — и у лыжеобразной, и у круглой стопы грунт под пяткой стопы становится более нагруженным, а напряжения под носком стопы снижаются (рис. 4, 5). В случае слабонесущего грунта под пяткой стопы в зоне наибольших напряжений имеют место пластические деформации, вследствие чего, из-за заглубления пятки стопы в грунт, сцепные свойства шагающего движителя возрастают.

Варьирование среднего давления стопы на грунт при неизменной форме стопы показало практически линейную зависимость напряжений от среднего давления как на поверхности грунта, так и в глубине грунта. Варьирование упругих свойств грунта при неизменной форме стопы показало, что упругие свойства грунта мало влияют на величину напряжений, что подтверждает исследования М. Г. Беккера [12], полученные для штампов. Распределение напряжений под лыжеобразной и круглой стопой при различных значениях среднего давления стопы на грунт имеет вид, аналогичный представленному на рис. 4 и 5.

Наибольшие деформации грунта имеют место непосредственно под стопой. Вокруг стопы грунт также деформируется. Существенные деформации могут наблюдаться даже на расстоянии 0,5–1,0 м от стопы. Помимо вертикальной деформации грунта, также присутствует его деформация в продольном и поперечном направлениях — грунт «выдавливается» из-под стопы. На величину деформаций в продольном и поперечном направлениях существенное влияние оказывают ширина и форма стопы. Во всех исследованных случаях продольные и поперечные деформации были на порядок меньше вертикальных. Варьирование упругих свойств грунта и среднего давления стопы на грунт при неизменной форме стопы показало близкую к линейной зависимость полных деформаций от указанных параметров. При этом распределение деформаций под стопой имеет вид, аналогичный представленному на рис. 6–8. При этом, как видно из контактных характеристик, представленных на рис. 9 и 10, имеют место зоны с различными условиями фрикционного контакта тел — жесткого сцепления и относительного проскальзывания.

Полученные в ходе моделирования закономерности контактного взаимодействия опорных элементов (стоп) шагающих машин и роботов с грунтом показывают, что возможна постановка задачи по выбору оптимальных размеров и формы стопы с целью существенного увеличения реализуемой по сцеплению силы тяги шагающих машин в условиях дефицита сцепного веса. Результаты работы могут быть востребованы при проектировании шагающих роверов и планетоходов, а также при разработке шагающих робототехнических систем передвигающихся по дну.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 16-08-01109-а, 18-38-00624 мол-а, стипендии Президента РФ СП-5102.2018.1.

1. Сравнительный анализ колёсных, гусеничных и шагающих машин / Е.С. Брискин, В.В. Чернышев, А.В. Малолетов, Н.Г. Шаронов // Робототехника и техническая кибернетика. - 2013. - № 1. - С. 6-14.
2. Comparative analysis of wheeled and walking machines / Е.С. Брискин, В.В. Чернышев, А.В. Малолетов, Н.Г. Шаронов // Экстремальная робототехника – робототехника для работы в условиях опасной окружающей среды (7th IARP RISE-ER`2013): тр. 7-го междунар. симпозиума, Санкт-Петербург, 2-3 окт. 2013 г. / РФФИ, ЦНИИ робототехники и технической кибернетики. - СПб., 2013. - С. 99-107.
3. Брискин, Е.С. Системный анализ колёсных, гусеничных и шагающих машин / Е.С. Брискин, В.А. Шурыгин, А.В. Малолетов // Прогресс транспортных средств и систем – 2013 : матер. междунар. науч.-практ. конф., Волгоград, 24-26 сент. 2013 г. / ВолгГТУ [и др.]. - Волгоград, 2013. - С. 322.
4. Design and underwater tests of subsea walking hexapod MAK-1 / В.В. Чернышев, В.В. Арыканцев, А.Е. Гаврилов, Я.В. Калинин, Н.Г. Шаронов // Proceedings of the ASME 2016 35th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering OMAE2016 (Busan, South Korea, June 19-24,

2016) / Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OOAE) Division of The American Society of Mechanical Engineers (ASME), Pusan National University. – [Busan], 2016. – 9 p.
5. Чернышев, В.В. Traction properties of walking machines on underwater soils with a low bearing ability / В.В. Чернышев, А.Е. Гаврилов // Minerals of the Ocean – 7 & Deep-Sea Minerals and Mining – 4 (St. Petersburg, Russia, 02–05 June, 2014) : abstracts of International Conference / VNIIOkeangeologia. - St. Petersburg, 2014. - С. 21-24.
6. Чернышев, В.В. МАК-1 – подводный шагающий робот / В.В. Чернышев, В.В. Арыканцев // Робототехника и техническая кибернетика. - 2015. - № 2. - С. 45-50.
7. Чернышев, В.В. Subsea tests of walking unit МАК-1 / В.В. Чернышев, А.Е. Гаврилов, В.В. Арыканцев // Joint International Conference Minerals of the Ocean–8 & Deep-Sea Minerals and Mining–5 (St. Petersburg, Russia, 13-16 June, 2016) : Abstracts / VNIIOkeangeologia. - Saint Petersburg, 2016. - С. 66-70.
8. Чернышев, В.В. Modeling of vibroimpact processes which occurs in feet changing of the walking units at viscoelastic grounds / В.В. Чернышев, А.А. Гончаров, В.В. Арыканцев // Procedia Engineering. Vol. 176 : Proceedings of the 3rd International Conference on Dynamics and Vibroacoustics of Machines (DVM2016), June 29 – July 01, 2016, Samara, Russia / ed. by Viktor Sverbilov and Andrew Plummer. – [Elsevier publishing], 2017. – P. 387-393.
9. Чернышев, В.В. Моделирование виброударных процессов, возникающих при смене стоп шагающих аппаратов на вязкоупругих грунтах / В.В. Чернышев, А.А. Гончаров, В.В. Арыканцев // Динамика и виброакустика машин (DVM`2016): матер. третьей междунар. науч.-техн. конф. (г. Самара, 29 июня – 1 июля 2016 г.) / ФГАОУ ВО «Самарский нац. исслед. ун-т им. акад. С.П. Королёва (Самарский ун-т)». - Самара, 2016. - С. 251-253.
10. Арыканцев, В.В. Модельные оценки влияния «компрессионной» силы на динамику глубоководного шагающего аппарата = Model estimates of the influence of forces on the dynamics of deep-water walking apparatus / В.В. Арыканцев, В.В. Чернышев // IV Международная школа-конференция молодых учёных «Нелинейная динамика машин» – School-NDM 2017 (г. Москва, 18-21 апреля 2017 г.) : сб. тр. / РНФ Российский науч. фонд, ФГБУН «Ин-т машиноведения им. А.А. Благонравова РАН» (ИМАШ РАН). - Москва, 2017. - С. 113-119.
11. Арыканцев, В.В. Влияние формы стопы шагающего движителя на напряжённое состояние грунта / В.В. Арыканцев, С.Е. Терехов, В.В. Чернышев // Альтернативные источники энергии в транспортно-технологическом комплексе: проблемы и перспективы рационального использования : сб. науч. тр. по матер. ежегодных конференций. Т. 3, вып. 1 : матер. междунар. науч.-практ. конф. «Транспортно-технологическому комплексу – энергоэффективную альтернативу» (г. Воронеж, 16-18 марта 2016 г.) / ВГЛТУ им. Г.Ф. Морозова. - Воронеж, 2016. - С. 166-171.
12. Беккер М.Г. Введение в теорию систем местность – машина. – М.: Машиностроение, 1973. – 520 с.

V.M. Bitny-Shlyakhto, I.A. Vasilyev

DEVELOPMENT OF THE PRINCIPLES OF INVESTIGATION AND CARTOGRAPHY OF THE WORKING ZONE OF ROBOTS

Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics, Saint-Petersburg
v_bitny@rtc.ru, vas@rtc.ru

Abstract

The tasks of survey and mapping are similar in the sense of constructing the rules of motion of the robot. For the survey, it is required to survey all sections of the working area (RZ), to build the map, it is required to "see" all the obstacles (at least from the "outside" side). In the case of a single robot, the task is to build such a trajectory to survey all the points of the working area (the "filling line" in this metric).

For a number of robots, the task is similar: it requires a working area to be divided into sections, the number of which should be equal to the number of robots.

In this paper, the principles of this analysis and the distribution of loads on group robots are discussed in detail.

Key words: robot, map, working area, observation.

В.М. Битный-Шляхто, И.А. Васильев

РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПОВ ОБСЛЕДОВАНИЯ И КАРТОГРАФИРОВАНИЯ РАБОЧЕЙ ЗОНЫ РОБОТОВ

ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург
v_bitny@rtc.ru, vas@rtc.ru

Аннотация

Задачи обследования и картографирования сходны в смысле построения правил движения робота. Для обследования требуется обозреть все участки рабочей зоны (РЗ), для построения карты требуется «увидеть» все препятствия (во всяком случае, с «внешней» стороны). Для единственного робота задача заключается в построении такой траектории, чтобы обозреть все точки рабочей зоны («заполняющей линии» в данной метрике).

Для множества роботов задача аналогична: требуется рабочую зону разбить на участки, количество которых должно равняться количеству роботов.

В работе подробно рассматриваются принципы данного анализа и распределение нагрузок на роботов группировки.

Ключевые слова: Робот, карта, рабочая зона робота, обследование.

Обзорные участки

Разделение рабочей зоны на обзорные участки (ОУ), имеющие такое качество, как близость к выпуклости, производится исходя из следующих соображений.

Размер конкретного участка, не имея дополнительной информации, можно задавать прямо пропорционально скорости конкретного робота. Под дополнительной информацией здесь понимаем сложность возможной траектории на данном участке. Например, один участок представляет собой лабиринт, а другой – чистую площадку.

Получить предварительную информацию (если нет более точной) можно и на начальном этапе: проанализировав сканы, полученные с датчиков внешней среды роботов (дальномеры и/или телекамеры). Анализ должен быть двухступенчатым:

1. Анализ свободных зон. То есть, требуется определить, какой процент свободного пространства есть в данном ОУ рабочей зоны. Другими словами, отношение свободного пространства к общей площади данного ОУ рабочей зоны, видимого с данного положения;

2. Изломанность линии сканирования. Насколько линия сканирования изломана в данном ОУ. По этому показателю можно с определённой долей вероятности судить о «лабиринтоподобности» данного участка рабочей зоны.

Описанные два анализа позволяют оптимальнее распределять нагрузку на роботов группировки. Поэтому подобный анализ желательно осуществлять довольно часто, по возможности проводить подобный мониторинг постоянно. При этом возможно оперативно менять задания для разных роботов группировки, что может резко сократить время на обследование и картографирование рабочей зоны.

Рассмотрим принципы данного анализа и распределение нагрузки на роботов группировки.

Сначала надо понять, как задавать размеры рабочей зоны. Естественно задавать рабочую зону как прямоугольник. Даже если известно, что она не может быть таковой (например, по причине непреодолимого препятствия), то задавать рабочую зону параметрически не практично, поэтому считаем:

1) Рабочая зона является прямоугольником;

2) В начальном положении (перед стартом) координаты роботов известны (т.е. известны координаты роботов в системе координат рабочей зоны, или, что тоже самое, известны координаты рабочей зоны в системе координат роботов);

3) В начальном положении роботы находятся на одной стороне рабочей зоны (на одной стороне прямоугольника рабочей зоны). Назовём эту сторону – стороной старта (СС).

Пункт 2 как раз и задаёт непосредственно саму рабочую зону.

Анализ свободных зон

Далее, требуется произвести анализ свободных зон. Это удобно делать дискретизировав СС по ширине минимального по размеру робота группировки. Теперь оцениваем свободное место в полосах от СС до противоположной стороны рабочей зоны (РЗ). Пусть размеры СС равны X метров, а по другой координате рабочей зоны – Y метров. Тогда, если минимальный размер робота q метров, получаем:

$$b_i = \frac{X\,Y \Big/ [\frac{X}{q}]}{s_i},$$

где

b_i – коэффициент свободной зоны в i-том ОУ РЗ;

[] – оператор вычисления ближайшего меньшего целого;

s_i – свободное место по показаниям дальномера.

Теперь надо учесть «лабиринтоподобность». Это можно учесть следующим образом. Будем считать, что априорно рабочая зона проходима. Другими словами, внутри рабочей зоны нет нерегулярных непреодолимых препятствий. Это можно предполагать исходя из того, что зона картографирования изначально не является полностью неизвестной (например, для местности могут существовать снимки из космоса, для помещений – план и т.д.).

Поэтому можно оценить искривлённость образующей скана по оригинальному методу. Требуется найти коридор движения робота. Для робота, снабжённого любым дальномером, две линии, являющиеся продолжением его правого и левого бортов, удобнее всего задать в нормальном виде, как показано на рисунке 1.

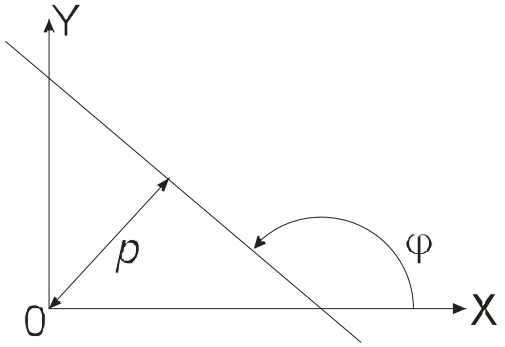


Рисунок 1 – Задание прямой в нормальном виде

Прямая задаётся двумя параметрами: расстоянием от начала координат p и углом от положительного направления оси абсцисс φ:

$$y\cos\varphi - x\sin\varphi = p$$

Расстояние от центра p удобно, так как оно соответствует полуширине робота. Разумеется, естественно брать полуширину наименьшего робота. Алгоритм нахождения требуемого угла поворота заключается в определении такого угла φ, чтобы линии с двух сторон не пересекали препятствия.

Здесь понимается просто движение в такое место, которое гарантированно доступно для габаритов робота и находится, во-первых, на прямой видимости робота, а во-вторых, максимально далеко от текущего положения робота.

Строится «колесо», лежащее горизонтально и имеющее диаметр, равный ширине робота. Это «колесо» «прокатывается» по видимому контуру препятствий, и находятся расстояния от текущего положения робота до центра колеса во все моменты времени.

На рисунке 2, иллюстрирующем алгоритм, белыми с тонкой окантовкой точками показано препятствие (так как любой дальномер имеет дискретность по углу, препятствия получаются состоящими из точек), жирными окружностями с радиусом r – ширина робота, направления на центры окружностей, находящиеся под углом α к роботу и в точках с координатами (x_1, y_1) и (x_2, y_2), серыми треугольниками с углом $\Delta\alpha$ – множество направлений на внутренние точки окружности.

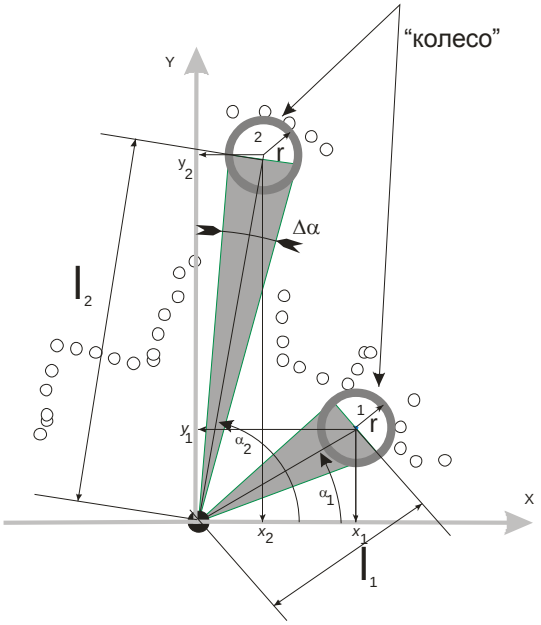


Рисунок 2 – Демонстрация алгоритма «колеса»

Алгоритм нахождения дальностей по направлениям следующий:

1. Для каждого направления и для каждой точки препятствия считаем дальность нахождения окружности по формулам:

$$x_0 = \frac{x_i + A\,y_i - \sqrt{r^2(1+A^2) - (-A\,x_i + y_i)^2}}{1+A^2},$$

где

x_0 – абсцисса центра окружности;

(x_i, y_i) - координаты текущей рассматриваемой точки препятствия;

r – радиус зоны безопасности робота (ширина робота + …);

A - тангенс угла направления на центр окружности.

Ордината центра окружности считается по классической формуле:

$$y_0 = A\,x_0.$$

Дистанция до текущего положения центра окружности:

$$l = \sqrt{x_0^2 + y_0^2}.$$

2. Для текущего направления вычисляем минимум l;

3. Для каждого направления получаем множество дистанций;

4. Для каждого направления вычисляем СКО и делим его на минимум l;

5. По этому показателю получаем коэффициент «лабиринтоподобности» c_i: чем меньше этот коэффициент, тем меньше лабиринт.

Определение параметров рабочей зоны

По этому коэффициенту можно судить о том, какова часть рабочей зоны может быть «видна» из одной (текущей) точки нахождения робота (дальномера). При малых коэффициентах (менее 0.05) данный сегмент рабочей зоны виден весь и для построения карты нет смысла перемещать робот.

Теперь имеем два параметра рабочей зоны: коэффициент свободной зоны (КСЗ) и лабиринтоподобность (ЛП). Тут есть четыре варианта:

1) Оба коэффициента большие: сильно нерегулярные, похожие на тонкие препятствия. Напоминает лес, кусты и пр. Сомнительно, что удастся построить хорошую карту;

2) КСЗ мал, ЛП большой: сильно заполненный лабиринт. Придётся значительно перемещать робот, чтобы построить карту;

3) КСЗ мал, ЛП мал: похоже, что рабочая зона непроходима. Это значит, что границы рабочей зоны заданы гораздо дальше, чем практически возможно. Так как границы РЗ задаются априори, то, вероятно, они заданы «с запасом». Ситуация такова – что в данном секторе процедура построения карты закончена;

4) КСЗ большой, ЛП – мал: построение карты не требует перемещения робота, так как весь сектор рабочей зоны виден с текущего места.

Проверку на эти оба параметра (КСЗ и ЛП) требуется осуществлять регулярно и, возможно, изменять задачи роботам группировки. Для этого требуется выбирать такие сектора рабочей зоны (количество секторов - не более количества роботов в группе), чтобы выполнялись условия 2, 1 – нежелательно. Критерием отказа в выборе сектора служат выполнение условий 3 и 4, так как в этих секторах карты построены.

Для определённости будем осуществлять проход по рабочей зоне «поиском в глубину». Робот движется в цель, заданную ранее, отмечая и запоминая участки рабочей зоны, в которых требуется побывать. По окончании движения в цель робот начинает выбирать запомненные участки и исследовать их.

Для выбора тех участков, в которых требуется побывать, осуществляется критерий, описанный выше: выполнение пункта 2, или, что нежелательно, 1. Если выполнены пункты 3 или 4 – карты в них считаются построенными.

Совмещение карт разных роботов

Для совмещения карт требуется знать текущую локализацию роботов. В то же время, совмещение карт даёт дополнительную поправочную информацию для той же локализации.

Обычно для гетерогенных по размеру роботов группировок применяют карты с разными по величине ячейками. Это делается для лучшего построения траекторий движения роботов. Но для совмещения таких карт требуется выполнение условия: размеры ячеек должны быть кратными числами. Иначе совместить карты получится с меньшей точностью и с неустранимыми погрешностями.

Пусть здесь имеем одинаковые по размеру ячейки.

Итак, есть два робота с координатами (x_1, y_1, α_1) и (x_2, y_2, α_2). У каждого робота построена бинарная клетчатая карта $m_1(i, j)$ и $m_2(n, k)$. Для совмещения требуется:

– перевести обе карты в одну систему координат. Для удобства эта СК будет базовой (БСК);

– найти подмножества ячеек карт, расстояние между которыми минимально. Здесь требуется построить такую метрику, чтобы это «расстояние» имело верный смысл;

– совместить карты внося поправку в координаты обоих роботов в БСК.

Здесь надо уточнить один вопрос. Роботов в группировке более двух, почему же тогда мы совмещаем карты лишь двух роботов? Совмещаем карты каких роботов?

Ответ такой: роботы патрулируют рабочую зону с целью построения карты. Соответственно, роботы стартуют цепью и распределены так, чтобы оперативно отследить всю доступную часть

рабочей зоны. Поэтому карты лишь двух соседних роботов могут пересекаться в значительном количестве ячеек. Дальние роботы могут иметь мало пересекающихся ячеек либо не иметь их совсем.

Далее находим подмножества пересечений. Здесь надо учесть случаи, когда ячейки лишь кажутся близкими по расстоянию, но не являются таковыми по смыслу – см. рисунок 3.

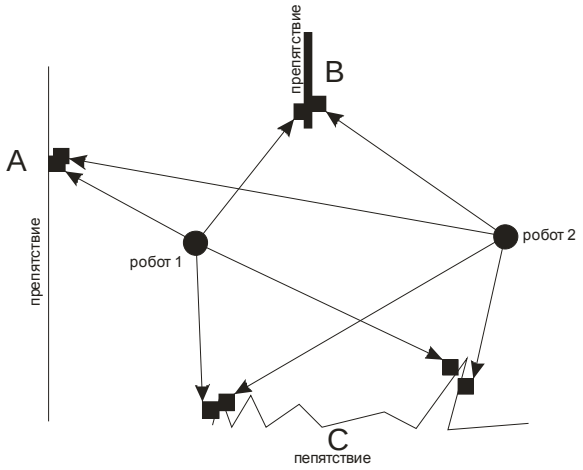


Рисунок 3 – разные ситуации совмещения ячеек карт

Для ситуации А – обе ячейки законно близки. Нет принципиальной разницы между измерениями роботом 1 и роботом 2. Для ситуации В видно, что расстояния между ячейками малы и их хочется поставить в соответствие, но по смыслу они являются измерениями препятствия с разной стороны и совмещать их нельзя.

Для ситуации С всё ещё хуже: нерегулярное препятствие может сильно повредить точности совмещения и, как следствие этого, локализации. Для избегания ситуаций В и С предложены следующие мероприятия:

– отбрасывание отдельных измерений, находящихся в полосе между роботами;

– отслеживание соседних ячеек – если они расположены таким образом, что роботы явно смотрят на одно препятствие с разных сторон – отбрасываем их. Здесь можно применить алгоритм построения отрезков прямых линий методом наименьших квадратов. А потом совмещать эти отрезки. На практике этот подход работает плохо. Во-первых, из-за погрешностей измерения и конечности любых объектов получается очень большое количество прямолинейных отрезков, что накладывает большие требования к производительности вычислителя. А, во-вторых, наличие в окружающем пространстве слишком многих объектов, образующие которых не являются прямолинейными отрезками.

– при любом подозрении в регулярности образующей препятствия отбрасывание ячеек. Имеется в виду, отбрасывание лишь для поправки локализации, но не для карты!

Так как координаты роботов (а, соответственно, и измерений) вычисляются в одной, базовой, системе координат, то совмещение ячеек несложно. По причине того, что взаимная неточность локализации может быть лишь линейным смещением и поворотом, то разрешается это следующим образом.

Как известно, преобразования координат на плоскости, задаются матрицей 3x3:

$$\begin{pmatrix} \cos\Delta\alpha & -\sin\Delta\alpha & \Delta x \\ \sin\Delta\alpha & \cos\Delta\alpha & \Delta y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

где

$\Delta\alpha$ - угол поворота между двумя СК (для одного и другого робота;

Δx и Δy – разница в линейных координатах двух роботов.

Синус и косинус связаны нелинейно, поэтому можем составить систему четырех линейных уравнений с четырьмя независимыми переменными:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial c}(c\,x_1^0 + s\,y_1^0 - x_1^1 + \Delta x)^2 = 0 \\ \frac{\partial}{\partial s}(-s\,x_1^0 + cy_1^0 - y_1^1 + \Delta y)^2 = 0 \\ \frac{\partial}{\partial \Delta x}(c\,x_2^0 + s\,y_2^0 - x_2^1 + \Delta x)^2 = 0 \\ \frac{\partial}{\partial \Delta y}(-s\,x_2^0 + cy_2^0 - y_2^1 + \Delta y)^2 = 0 \end{cases},$$

где

$\frac{\partial}{\partial i}$ - оператор частной производной по переменной *i*;

c и *s* – соответственно искомые косинус и синус угла поворота;

Δx и *Δy* – соответственно искомые абсцисса и ордината смещения;

Решение этой системы линейных уравнений слишком громоздко, чтобы приводить его здесь.

Теперь есть количественные показатели совмещения карты и поправок в локализации.

Итак, требуется совмещать индивидуальные карты в некоторую общую, совмещённую карту, которая будет более информативна.

Алгоритм следующий:

1) если на общей карте и индивидуальной карте ячейка занята (З), то она остаётся занятой;

2) если на общей карте ячейка неизвестна (Н), а на индивидуальной она занята – то она становится занятой;

3) если на общей карте ячейка занята, а на индивидуальной она неизвестна – то она остаётся занятой;

4) если на общей карте ячейка неизвестна, а на индивидуальной она свободна – то она становится свободной;

5) если на общей карте ячейка свободна (С), а на индивидуальной она неизвестна – то она остаётся свободной;

6) если на общей карте ячейка свободна, а на индивидуальной она занята – то она становится неизвестной;

7) если на общей карте ячейка занята, а на индивидуальной она свободна – то она становится неизвестной;

8) если на обеих картах ячейка свободна – она остаётся свободной;

9) если ячейка на обеих картах неизвестна, то она остаётся неизвестной.

Наглядно это иллюстрируется таблицей.

Таблица 1. Совмещение индивидуальных карт

	Общая карта			
Индивидуальная карта робота		З	Н	С
	З	З	З	Н
	Н	З	Н	С
	С	Н	С	С

Здесь: З – занято, С – свободно, Н – неизвестно.

1. Л.Шапиро, Д.Стокман. Компьютерное зрение. М., «БИНОМ. Лаборатория знаний», 2007
2. I. Vasilyev, A. Lyashin. Control System of Mobile Vehicle Developed for Cross-Country Motion. // Труды конференции «IEEE International Symposium on Industrial Electronics 2005», pp. 173-175, Dubrovnik – Croatia.
3. И.А. Васильев. Построение карты окружающего пространства для колёсного робота, снабжённого лазерным сканирующим дальномером. // Труды XXI Международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника» - 2010

O.P. Goidin[1], I.L. Ermolov[2], S.A Sobolnikov[1]

ROBSIM SOFTWARE FOR MOBILE ROBOTS MODELING

[1] FSUE VNIIA, Moscow
[2]Institute for Problems in Mechanics of RAS
crer@vniia.ru, ermolov@ipmnet.ru

Abstract

This paper discusses issues of Unmanned Vehicles' (UV) modeling at various stages of their life-cycle. It presents software system RobSim. RobSim has a capacity to develop models of UVs of high complicity and perform modeling of their functioning. The paper describes structure of RobSim software with basic developers' tools including high-level robotic languages programming and control.

Key words: mobile robot, unmanned vehicle, modeling, software, simulator.

О.П. Гойдин[1], И.Л. Ермолов[2], С.А. Собольников[1]

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ROBSIM ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ

[1]ВНИИА им. Н.Л. Духова, г. Москва
[2]Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского
Российской академии наук (ИПМех РАН), г. Москва,
crer@vniia.ru, ermolov@ipmnet.ru

Аннотация

В докладе представлена актуальность использования комплексов моделирования на всех этапах жизненного цикла мобильного робота. Приведены основные функциональные возможности программного комплекса Robsim для разработки моделей мобильных роботов и моделирования их работы. Описана структура программного комплекса с основными инструментами для разработки моделей МР. Представлен редактор систем управления, позволяющий реализовывать любые алгоритмы управления за счет возможности создания пользовательских блоков управления на языках высокого уровня.

Ключевые слова: мобильный робот, моделирование, программное обеспечение, тренажер.

Введение

Мобильный робот (МР) – это комплексная система со сложной структурно-функциональной схемой [1,2]. Функциональное назначение любого МР определяет специфические требования к его конструкции, техническим возможностям шасси, навесного оборудования и одновременно определяет характерные особенности окружающей среды и обстановки, в которых МР должен в полном объеме реализовывать заложенный в него функционал. Подтверждение правильности технических решений, закладываемых на этапе разработки в конструкцию МР, требует большого объема макетирования и изготовления нескольких опытных образцов, что приводит к большим материальным и временным затратам.

Альтернативой, по мнению авторов, является метод математического моделирования и трехмерной визуализации МР и его окружения. Такое моделирование позволяет оценить функциональную эффективность МР в конкретных условиях окружающей обстановки, определить целесообразность принимаемых решений, сократить существенную часть полевых испытаний, осуществить выбор оптимального плана выполнения технологических операций, в том числе в группе.

Таким образом, для мобильной робототехники актуальной задачей является применение программного комплекса, позволяющего проводить моделирование функционирования МР в рабочей среде на всех этапах жизненного цикла. Такой программный комплекс должен предоставлять разработчику полный набор возможных подсистем для реализации МР, а также удобный механизм модификации моделей и создания виртуальных сцен.

В качестве такого инструмента может быть использован комплекс математического и графического моделирования Robsim, который разработан и применяется на практике в Центре робототехники ВНИИА им. Н.Л. Духова.

Функциональные возможности комплекса Robsim

Последняя версия комплекса Robsim предоставляет полный функционал для разработки моделей МР. Далее перечислены основные функции программного комплекса.

1. Создание трехмерной модели мобильного робота. При этом описывается движитель, основные массогабаритные параметры, информация о полезной нагрузке, датчиках и т.д.

2. Robsim предоставляет инструментарий для разработки модели рабочей среды МР. Рабочая среда может описываться достаточно детально с варьированием точек и интенсивности освещения, наличием препятствий с определенными физическими свойствами и т.п.

3. Описывается система управления МР, которая позволяет реализовывать любые по типу и сложности алгоритмы управления. При этом управление моделью может осуществляться как с реального поста управления МР, так и с его программной модели, полностью копирующей реальную. Управление МР осуществляется в дистанционном (ручном) или автономном режиме [4].

4. Во время моделирования оценивается состояние всех подсистем МР. При этом на основе законов механики моделируется ситуационное поведение МР, оцениваются возможные коллизии, столкновения с препятствиями, опрокидывание МР, взаимодействие с элементами среды и т.д.

5. Режим группового моделирования, при которой несколько моделей МР, рассчитываемых на разных компьютерах одной локальной сети, могут производить какие-либо действия на одной виртуальной сцене.

6. Оператор может "наблюдать" за поведением МР по формируемым изображениям «бортовых» телекамер, "поставленных стационарно в помещении", с соседних МР или с выбранной точки пространства.

7. Ведение записи моделирования с фиксацией в пространстве и времени всех динамических параметров объектов рабочей области.

Функциональные возможности комплекса Robsim дают разработчикам следующие преимущества:

– возможность заранее оценить эффективность проектируемых образцов роботов, до стадии их изготовления;

– возможность оценить целесообразность включения того или иного компонента в состав робота, оценка степени его влияния на робот в целом (это, например, актуально для оценки применимости той или иной полезной нагрузки на унифицированном шасси);

– поиск "узких мест" в структуре робота (например, какой из компонентов снижает эффективность робота в целом);

– оценка достаточности ресурсов робота для выполнения задания;

– оценка работоспособности робота в случае повреждения отдельных из его компонент;

– синхронизация и оптимизация ресурсов (энергетических, информационных) внутри робота;

– планирование применений роботов в группах;

– прогнозирование поведения роботов в составе группировок противоборствующих сторон;

– применение роботов в составе смешанных групп (т.е. вместе с экипажными средствами).

Особенно актуально применение такого комплекса моделирования при создании роботов с автономным применением.

Структура программного комплекса

На рисунке 1 представлена структура программного комплекса Robsim. RobSim состоит из ряда подсистем представленных ниже.

1. Пользовательская оболочка представляет собой интерфейс пользователя для выбора сцен и роботов, участвующих в процессе тренировки, с последующим запуском комплекса. Оболочка загружает подсистемы: моделирования системы управления, моделирования динамики и визуализации

тренировочных сцен и обеспечивает централизованный обмен данными между этими подсистемами в процессе моделирования, включая возможность записи процесса моделирования. В режиме симуляции обеспечивается возможность реконфигурирования интерфейса пользователя в виде полиэкранного представления – в отдельных областях интерфейса отображаются видеопотоки со штатных и дополнительных камер, а также виртуальные пульты робототехнического комплекса. Обеспечивается загрузка различных конфигураций видеовывода – на монитор ЭВМ, с возможностью использования дополнительного монитора, либо на мониторы поста управления.

2. Подсистема моделирования системы управления предназначена для моделирования логики и интерфейса управления МР. Обеспечивается загрузка файлов системы управления формата ctp, их визуализация и интерактивное управление элементами пультов, а также выполняется расчет структурно-логических схем системы управления. Результаты расчета системы управления передаются в модуль расчета динамики через программную оболочку в виде сигналов исполнительной системе МР.

3. Подсистема моделирования динамики предназначена для проведения расчетов параметров состояния системы «робот-сцена» с использованием ее математической модели. Программная оболочка конвертирует модели сцен и МР из файлов s3d и r3d в формат подсистемы моделирования динамики dat. Моделируемые динамические элементы включают тела, шарниры, аппроксимирующие контактные контейнеры, линейные и вращательные двигатели и повторители, колеса с разными типами подвесок, сменный инструмент, пружины, дифференциалы, датчики столкновений и т.д. В результате расчета динамики формируются данные о положении и ориентации элементов моделей сцены и МР, которые далее передаются в систему визуализации через пользовательскую оболочку.

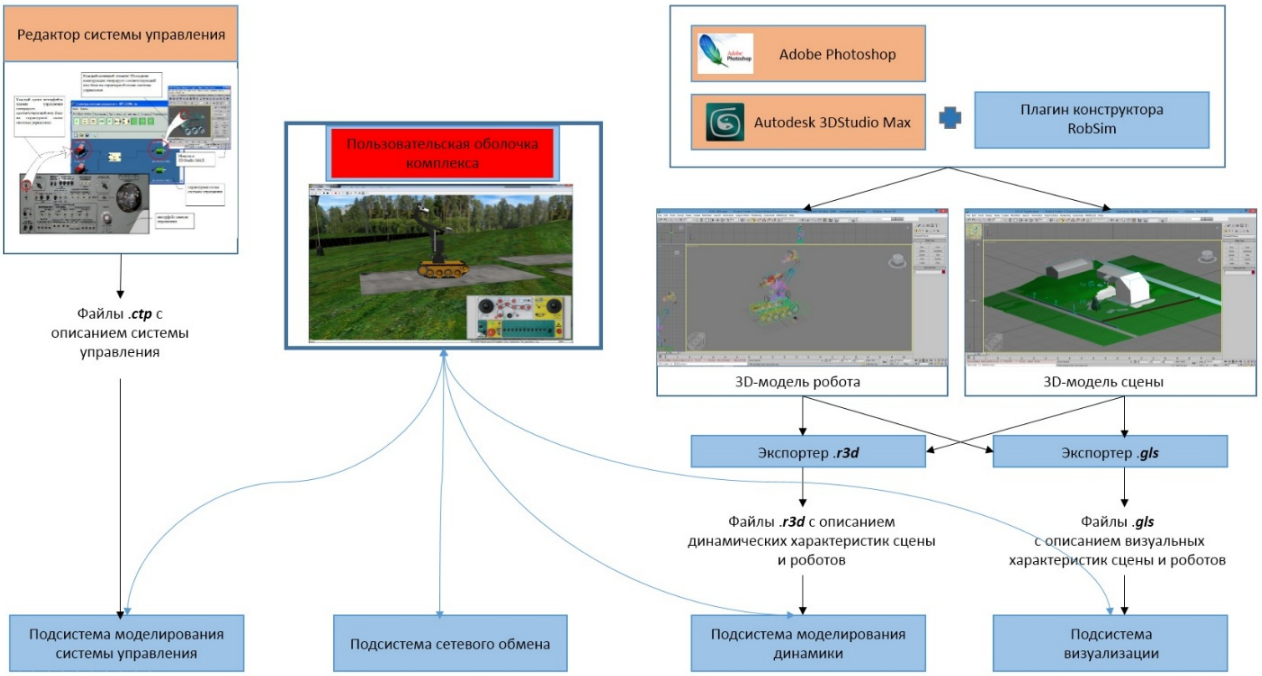


Рисунок 1 – Структурная схема ПК Robsim

4. Подсистема визуализации предназначена для высококачественной визуализации виртуальных трехмерных сцен. Модуль визуализации осуществляет загрузку сцен формата gls, экспортированных из графического редактора трехмерного моделирования «3D Studio Max» и обеспечивает их визуализацию с максимально возможным соответствием исходному виду в системе моделирования. Подсистема поддерживает визуализацию поверхностей со сложными материалами, включающими текстуры отражения, прозрачности и рельефа; позволяет моделировать реалистичное освещение с генерацией теней на основе технологии шейдеров и такие эффекты как пламя, дым и вода. Модуль имеет возможность синтеза изображения в нескольких конфигурируемых портах с разными средствами наблюдения; а также позволяет проводить визуализацию виртуальных сцен в стереорежиме с использованием различных технологий объемного зрения. Управление элементами и

параметрами сцены осуществляется с помощью набора интерфейсных функций динамической библиотеки.

5. Редактор системы управления, входящий в состав программного комплекса, предназначен для описания систем управления МР и сцен. Разработанные системы управления записываются в файлы ctp, которые в режиме моделирования загружаются и обрабатываются подсистемой моделирования системы управления.

Разработка 3D-моделей роботов и сцен

При разработке тренажеров ПК Robsim использует функционал ряда программных платформ. Основной платформой для создания 3D-моделей роботов и сцен и их параметризации является Autodesk 3DStudio Max (3DSMax). Для создания модели могут применяться стандартные компоненты программы. Помимо этого, разработан плагин (конструктор), имеющий специфический набор компонент (рис. 2). В частности, при помощи плагина появилась возможность оперативно моделировать такие компоненты МР как: типы подвесок шасси, колеса, гусеницы, схваты, манипуляторы и т.д.

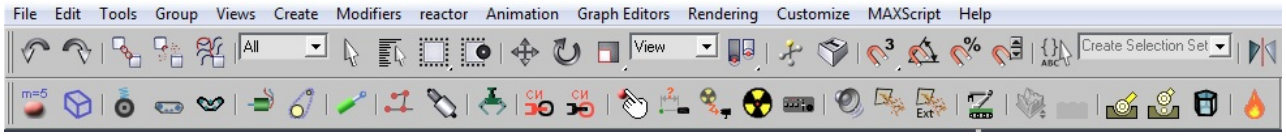


Рисунок 2 – Панель плагина-конструктора на панели инструментов 3DSMax

Также при помощи плагина-конструктора производится физическая параметризация моделей роботов и сцен (массо-инерционные характеристики тел, тип материалов поверхностей моделей, параметры двигателей, тормозов и т.д.). При помощи соответствующих экспортеров, создаются файлы, хранящие визуальные и динамические характеристики роботов и сцен, которые затем загружаются в подсистемы визуализации и моделирования динамики, соответственно. На рисунке 3 представлены мобильные роботы в рабочем окружении и их программные модели, разработанные с помощью конструктора Robsim.

Рисунок 3 – 3D-модели, разработанные при помощи плагина-конструктора для 3DSMax

Область применения современных МР включает в себя работы в экстремальных средах, в частности: дезактивация радиоактивных материалов с использованием различного навесного оборудования, пожаротушение, разбор завалов и т.д. Учитывая необходимость учета подобных операций в процессе моделирования, в Robsim реализован ряд инструментов (рис. 4):

Рисунок 4 – Тренировка по устранению последствий аварийных ситуаций (разбор завала, перекрытие трубопровода, пожаротушение)

– моделирование сложных динамических процессов, включающих в себя взаимодействие большого количества объектов сложной формы (моделирование завалов);

– моделирование процессов демонтажа и разбора завалов;

– моделирование систем и средств пожаротушения, а также дыма и пламени.

Моделирование системы управления МР

Для создания пульта управления моделью робота, разработан специальный редактор «CtrlPanel». В программном комплексе Robsim предусмотрена возможность использования как виртуальной панели управления роботом, отображаемой на экране монитора и приводимой в действие стандартными устройствами ввода (клавиатура, мышь), так и подключаемого физического (реального) пульта поста дистанционного управления (ПДУ) МР.

Виртуальная панель управления роботом состоит из двух частей: интерфейсной и алгоритмической (рис. 5). Интерфейсная часть представляет собой совокупность виртуальных органов управления. Алгоритмическая часть воплощает структурную схему системы управления в виде логических связей между органами управления и исполнительными механизмами конструкции.

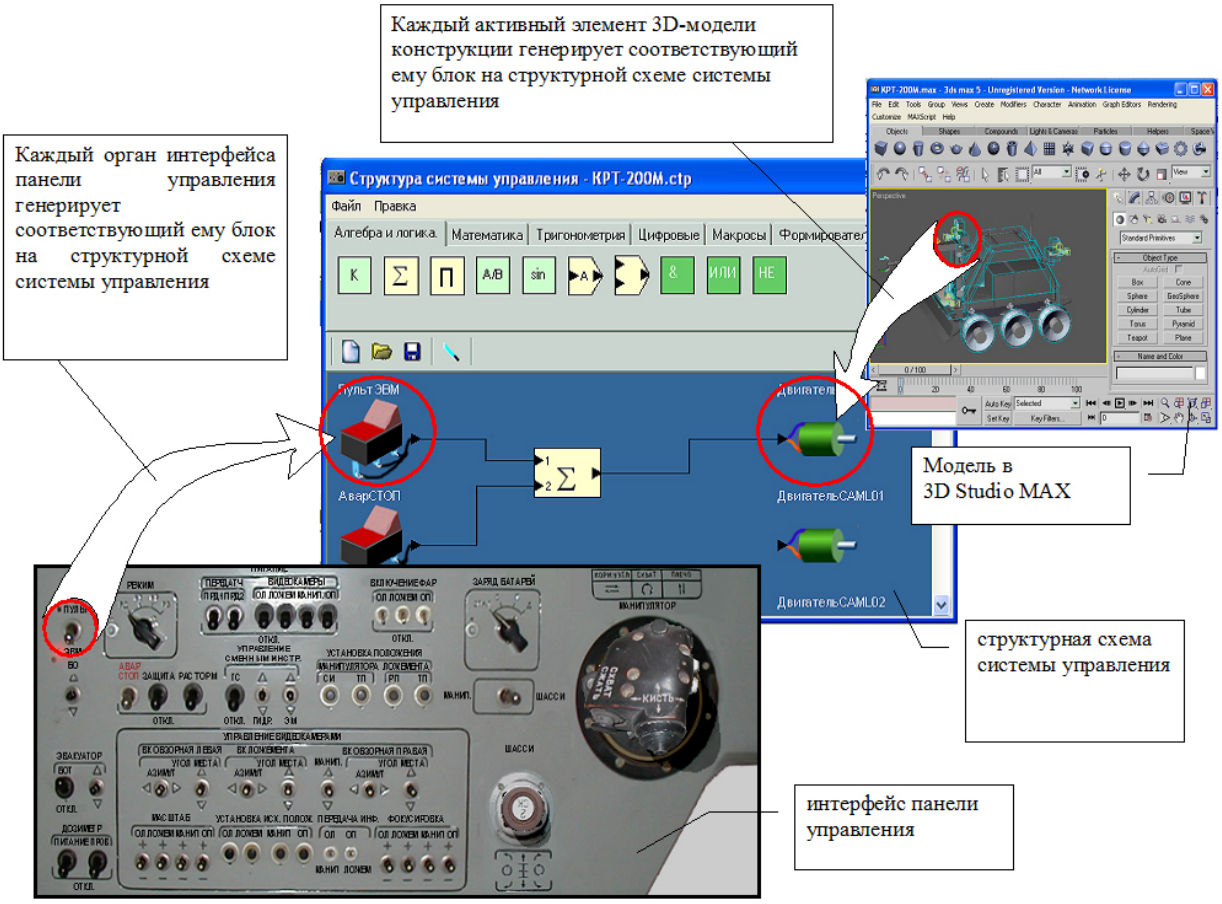


Рисунок 5 – Функциональная схема построения виртуальной панели управления роботом

В RobSim была реализована возможность разработки собственных блоков для системы управления. Эти блоки используются совместно со стандартными блоками из библиотеки, и позволяют разработчику описать логику их работы на языке высокого уровня. Каждый такой блок подключается как Plug'in в редактор панели управления и в основной программный модуль. Причем один Plug'in может содержать несколько блоков. Plugin можно создавать на любой 32-битной версии среды разработки приложений.

Тренажерный режим

Данный комплекс математического и графического моделирования может использоваться как для моделирования МР с целью оценки конструктивных решений и возможностей системы управления еще на стадии разработки, так и в качестве тренажера для обучения операторов реально эксплуатируемых МР [3].

На рисунке 6 представлен процесс обучения оператора работы с мобильным робототехническим комплексом при использовании реального поста управления. При этом на мониторы поста управления выводится информация с камер компьютерной модели МР, повторяющая изображения реальных камер робота.

Рисунок 6 – Процесс тренировки с подключением реального пульта ПДУ

Использование операторами компьютерных тренажеров позволяет:

– осваивать основные приемы управления МР, включая работу с навесным оборудованием;

– получать навыки работы с МР в различных условиях (преодоление препятствий, работа в ограниченном пространстве, перемещение различных предметов и т.д.);

– использовать режим сетевой тренировки для отработки взаимодействия между операторами различных МР;

– осуществлять планирование дистанционных работ с помощью МР и выбор средств для их производства.

Заключение

Моделирование РТК является важным инструментом, применяемом на разных этапах жизненного цикла РТК. Развитие универсальных систем моделирования, применимых для различных видов РТК, является важной задачей отечественной робототехники.

ПК RobSim даёт разработчику и пользователю РТК мощный инструмент, позволяющий осуществить моделирование функционирования различных образцов РТК в различных средах при выполнении различных задач. Данная платформа может рассматриваться в качестве базовой для создания перспективной системы моделирования РТК.

Развитие ПК Robsim предусматривает внедрение возможности моделирования систем управления МР с использованием элементов искусственного интеллекта для автономного применения РТК. Для реализации данной задачи разработана концепция, включающая планы модернизации алгоритмов и программных модулей подсистем комплекса.

Важным направлением работы является перспектива моделирования группового применения роботов (например, задачи описанные в [5]).

Часть работы над данным материалом выполнена по теме государственного задания (№ госрегистрации АААА-А17-117021310384-9).

1. Ермолов И.Л., Хрипунов С.П., Благодарящев И.В., Хрипунов С.С., Типовая структурно-функциональная схема робототехиических комплексов военного назначения, "Информационно-измерительные и управляющие системы", №6, 2017.

2. Ермолов И.Л., Хрипунов СП., Формирование обобщенной структурной схемы робототехнических комплексов, "Робототехника и техническая кибернетика", № 1, 2017.
3. Ермолов И.Л., Никитин В.Н., Собольников С.А.. Интерактивный тренажер для операторов мобильных роботов с элементами актуальной адаптации, "Мехатроника, автоматизация, управление", №9, 2010, — с.45-51.
4. Ермолов И.Л., Автономность мобильных роботов, её меры и пути её повышения. "Мехатроника, автоматизация, управление" №6, 2008.
5. Ермолов И.Л., Собольников С.А., Решение задачи распределения группы мобильных роботов для обеспечения работы подвижной коммуникационной сети, "Вестник МГТУ "СТАНКИН", № 4, 2012.

I.L. Ermolov, S.P. Khripunov

ISSUES OF GROUP-BASED USAGE OF UNMANNED VEHICLES

Scientific Council on Robotics and Mechatronics of RAS,
Russia, Moscow, Vernadskogo ave. 101-1, ermolov@ipmnet.ru

Annotation

Using Unmanned Vehicles (UV) in groups creates new challenges in various robots' applications. This paper studies various issues of multi-UV scientific, technical and organizational research.

Key words: robots, unmanned vehicles, multi-robot applications.

И.Л. Ермолов, С.П. Хрипунов

ПРОБЛЕМЫ ГРУППОВОГО ПРИМЕНЕНИЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

Научный совет по робототехнике и мехатронике РАН Москва
ermolov@ipmnet.ru

Аннотация

Групповое применение робототехнических комплексов открывает новые перспективы при решении ресурсоемких и сложных задач в различных отраслях человеческой деятельности. В статье освещаются и анализируются проблемные вопросы, связанные с групповым применением роботов, и предлагаются возможные пути их решения.

Ключевые слова: роботы, групповое применение РТК, групповое управление РТК.

В настоящее время особая роль в обеспечении национальной безопасности и обороны государства отводится военной робототехнике. Темпы развития военной робототехники определяют уровень технологического превосходства средств вооруженной борьбы и облик перспективных роботизированных армий.

В силу прогнозируемого характера войн будущего, проявляющегося, в том числе в противоборстве группировок боевых роботов, важнейшим направлением в области роботизации вооруженных сил является отработка технологий группового применения однотипных, разнотипных робототехнических комплексов военного назначения (РТК), а также обеспечения совместных действий с обычными (экипажными) средствами вооруженной борьбы [1].

Немаловажное значение имеет групповое применение и в гражданской сфере, включая сервисное обслуживание.

Групповое применение РТК подразумевает совместные согласованные действия нескольких единиц роботов, направленные на решение общей задачи и реализацию целевого назначения группы роботов [2].

Фактически групповое применение роботов является комплексированием функциональных возможностей агентов, составляющих группу.

Одним их главных преимуществ группового применения РТК является возможность достижения синергетического эффекта, состоящего в существенном увеличении функционального потенциала группы по сравнению с отдельно взятыми единицами роботов [3].

Преимущества группового применения роботов проявляются следующим образом [4]:

– Формированием группировок разнородных по основному функциональному предназначению роботов. Действительно, в технике известен принцип, в соответствии с которым универсализм ведёт к снижению функциональных показателей качества машин. Это же имеет место и в робототехнике. Базируясь на основных 6 функциях, реализуемых роботами [8] (транспортная, информационная, интеллектуальная, энергетическая, технологическая и коммуникационная), можно выделить 6 соответствующих основных функциональных видов роботов: транспортные роботы, роботы-разведчики, роботы-координаторы, роботы-заправщики, ударные роботы, роботы-ретрансляторы. Очевидно, что полноценное эффективное решение сложных функциональных задач будет возможно именно путём применения группировки роботов с различным ключевым функциональным предназначением.

– Применение роботов группой позволяет повысить диапазон их функциональных возможностей, сравнительно с диапазоном функциональных возможностей отдельных образцов. Это позволяет применять РТК сравнительно упрощённой структуры для решения сложных задач, что приводит к значительному выигрышу в вопросах стоимости решения задач, маскировки, уязвимости. Особенно ярко это проявляется для решения задач разведки, ретрансляции [15], снабжения.

– Групповое применение РТК позволяет широко применять дублирование, обеспечивая повышение вероятности выполнения поставленной задачи, несмотря на противодействие противника или неблагоприятные условия среды. В случае потери одного или нескольких агентов группы, эти функции могут быть перераспределены и выполнены другими агентами группы.

– В группе РТК каждый из агентов может быть оснащен пусть и дублирующей, но разнообразной по принципу действия полезной нагрузкой (например, фрезерная установка у одних агентов, и покрасочный пистолет у других агентов), что также приведёт к расширению спектра задач, решаемых такой группой.

– Применение РТК в группе позволяет оперативно перераспределять ресурсы между членами группы (прежде всего, интеллектуальные, энергетические), обеспечивая решение задач, требующих больших затрат ресурсов.

– Применение роботов в группе значительно усложняет противодействие РТК со стороны противника [16]. Действительно, многие современные средства противодействия рассчитаны на противодействие одновременно нескольким целям. Потенциально уровень промышленных технологий имеет возможность предоставить в распоряжение десятки тысяч роботов (пусть и с ограниченным функционалом). Таким образом, при решении ряда задач можно будет применить одновременно сотни роботов, что приведёт к переизбытку средств противодействия и снизит их эффективность.

– Важным аспектом является безэкипажность РТК. Отсутствие экипажа ведёт к тому, что стоимость потери этого образца техники становится несоизмеримо ниже, чем стоимость экипажного средства. Это открывает возможность других подходов к планированию технологических операций, при которых на часть роботов будет изначально закладываться задача приступить к выполнению технологической операции без возможности выживания, но для достижения успеха в более общих задачах (например, инспекция пожаров, сбор высокорадиоактивных отходов и прочее).

Обобщая вышеизложенное, можно отметить, что к основным факторам, стимулирующим групповое применение РТК как в военной, так и в гражданской сфере, помимо ранее выделенных, относятся следующие:

– ограниченные возможности одиночных образцов РТК;

– жесткие сроки выполнения заданной РТК миссии;

– большие размеры территорий (масштаб) применения РТК;

– разноплановость частных задач в составе общей для группы РТК задачи;

– высокие требования к вероятности выполнения поставленных перед РТК задач.

Несмотря на очевидные достоинства группового применения РТК и стимулирующие его внедрение факторы, оно пока не нашло широкого внедрения в практику отечественной робототехнике.

Причиной такого положения, по мнению авторов, является ряд проблемных факторов, прямо или косвенно сдерживающих распространение группового применения РТК. Данные факторы можно условно разделить на проблемные факторы организационно-технического характера и проблемные факторы научно-технического характера.

К числу основных проблемных факторов организационно-технического характера относятся следующие:

– частичная определенность перечня задач группового применения РТК. Достаточно убедительно обоснованы некоторые отдельные типовые задачи, требующие группового применения РТК, такие как: мониторинг; инспекция; ретрансляция данных. Однако не существует общих методик обоснования целесообразности (необходимости и возможности) группового применения РТК и оценки эффективности группового применения РТК;

– недостаточно глубокая проработка требований к РТК группового применения, в частности: 1) к РТК как отдельной функциональной единице; 2) к РТК как элементу группы; 3) в целом к группе РТК как единому целому.

– низкий уровень исследований, касающихся способов группового применения РТК. Слабая проработка теоретических основ и практических рекомендаций по применению и обеспечению РТК в составе групп при подготовке и в ходе боевых действий;

– несовершенство подходов по обоснованию и выбору метода (стратегии) управления группой РТК. Существует достаточно хорошо проработанная теоретическая база стратегий группового управления, включающая следующие разновидности: централизованное; децентрализованное и комбинированное управление. Подробно этому вопросу посвящены работы [5,6]. Несмотря на то, что многие разработчики защищают те или иные стратегии [10], авторы данной статьи считают, что в групповом применении все стратегии будут иметь свои преимущества, в зависимости от особенностей применения. Так для решения достаточно простых задач группировками однородных роботов будет предпочтительна роевая стратегия. По мере появления разнородных роботов в группировке более эффективной станет коллективная стратегия. А для решения сложных задач в динамично изменяющейся недетерминированной среде более эффективной будут централизованные стратегии. Вместе с тем, практические методические рекомендации по определению и выбору наиболее рациональной стратегии, до сих пор, не существуют;

– недостаточный уровень алгоритмического обеспечения группового применения РТК. Глубина проработки вопросов автоматизации управления и тактики группового применения РТК оставляет желать лучшего. Без должного внимания оставлена разработка алгоритмического обеспечения выполнения задач, предусматривающих групповое применение РТК, в частности, информационного обеспечения; алгоритмов выбора тактики действий; распределения задач; определения рациональных тактических приемов и др.;

– непроработанность нормативно-правовой базы по групповому применению РТК. Отсутствуют соответствующие нормативные правовые акты; инструкции; наставления; рекомендации и др., в том числе, регламентирующие применение РТК в автономном режиме и определяющие ответственность за последствия такого применения;

– нечеткость понятийного аппарата «групповое применение РТК». В настоящее время для обозначения применения РТК в составе группы используются такие понятия как: «стая»; «рой»; «облако»; мультиагентная или многоагентная система; подразделение; формирование; боевая система; группа. Причем масштаб группового применения РТК и состав групп как по их числу, так и по типажу при этом не определен. Это вызывает неоднозначность понимания самого явления группового применения РТК;

– несформированность методического обеспечения системы испытаний группового применения РТК. Слабая проработка вопросов определения проверяемых характеристик РТК; отработки тактических приемов и способов применения РТК, оценки эффективности группового применения РТК и др.

Проблемные факторы научно-технического характера включают:

– *низкий уровень автономности РТК*. В [8] было показано, что применение роботов в группе возможно только при высоком уровне автономности отдельных образцов. Действительно, большинство применяемых, в настоящее время, образцов РТК функционируют в режиме телеуправления с участием в процессе управления человека-оператора, и имеют низкий уровень

автономности. При групповом применении одновременная координация действий нескольких операторов будет крайне затруднена, а при наличии значительного числа операторов, и невозможна. Поэтому для того, чтобы применять роботы в составе групп, следует значительно повысить уровень их автономности, и, в первую очередь, путём повышения интеллектуальности бортовых систем управления РТК;

– *оценка эффективности функционирования группы роботов.* Вопрос оценки эффективности машин, вообще, и РТК, в частности, является открытым. Есть некоторые работы, например, [3,17], однако они посвящены экипажным машинам, и, к тому же, как правило, в одиночном применении. Оценка синергетического эффекта представляется ещё более сложной проблемой;

– *вопрос планирования выполнения заданий группой РТК* только начал прорабатываться. Эта задача затрагивает как аспект распределения заданий между участниками группы, так и методы формирования состава разнородной группы, учитывающие эффективность выполнения задания и особенности среды;

– *планирование траекторий движения РТК* в составе группы уже имеет некоторые эффективные решения для ряда применений. Сюда относят и решение строевой задачи. В [18] эта задача решена для группы РТК, выполняющей задачу создания ложных целей или выполняющих роль фазированной антенной решётки, а в [15] предложены решения данной задачи для задачи ретрансляции сигналов. Важно отметить, что задача планирования траектории для роботов в группе является более сложной, чем для одиночных роботов, поскольку требует многокритериальной оптимизации (например, предотвращение столкновений между агентами, одновременно поддерживая коммуникационную связь, и обеспечивая минимизацию пути);

– *обработка информации*, поступающей от отдельных агентов, и воссоздание единой картины среды является более разработанной тематикой. Данная тематика хорошо проработана исследователями, работающими в области комплексирования данных [13], систем технического зрения и распределённых сенсорных систем;

– важной является *задача управления распределением ресурсов* между агентами группы. Как уже было отмечено выше, группы разнородных роботов имеют важное преимущество возможности осуществления перераспределения ресурсов внутри группы. В вычислительных системах эта задача эффективно решена. То же касается информационных ресурсов. Однако на практике помимо перераспределения вычислительных ресурсов может иметь место перераспределение энергетических и транспортных ресурсов; уже сейчас при групповом применении роботов пользователи сталкиваются с проблемой распределения коммуникационных ресурсов в группе. Эта задача ещё требует своего решения [9];

– *сценарии различных применений РТК в группе* могут значительно отличаться от аналогичных сценариев, но решаемых при непосредственном участии человека. Зачастую робот рассматривают просто как замену человеку, то есть пытаются сделать робот, зеркально воспроизводящий движения и функции человека. На самом деле, роботизация позволяет коренным образом изменить саму суть решения ряда функциональных задач. Это надо учитывать и заново осмыслить различные сценарии применения РТК. Помимо этого, ещё есть проблема того, что, на настоящий момент, многие проекты роботизации очень фрагментарны. То есть они ставят целью роботизацию какой-то одной отдельной технологической операции. Опыт роботизации советской промышленности в 1980-х гг. показал, что фрагментарная роботизация (когда пара роботов работала на конвейере вместе с людьми) малоэффективна и плохо себя оправдывает. При постановке задач роботизации необходим комплексный подход, дающий максимальную эффективность от такой роботизации;

– *стандартизация и унификация* уже сейчас являются проблемой для применения роботов в группе [12]. Поскольку зачастую роботы даже одного производителя иногда не имеют унификации между собой, то это создаёт серьёзные препятствия их групповому применению. Имеет место отсутствие унифицированных интерфейсов и протоколов обмена данными для обеспечения группового применения РТК (единого языка общения между РТК; средств сопряжения и коммуникаций; информационного обмена в группе типа: РТК – РТК, РТК – ПУ, РТК – АСУ; есть преобладание проприетарных (собственного изготовления, «кустарных») протоколов обмена и др.).

Первоочередными при организации группового применения РТК являются вопросы унификации и стандартизации протоколов информационных обменов и языка программирования. Помимо этого, перспективным является унификация и стандартизация различных интерфейсов и конструктивных

элементов. Важным этапом в этом вопросе является принятие единой обобщенной типовой схемы-деления, определяющий состав базовых элементов РТК [14] (см. рис. 1).

Рисунок 1 – Обобщённая типовая схема-деления РТК

Помимо перечисленных, дополнительно можно отметить следующие недостатки:

– недостаточная информационная осведомленность (низкие возможности средств наблюдения, обнаружения, распознавания, комплексирования данных);

– отсутствие специфических технологических средств повышенной мощности и надежной избирательности объектов воздействия, а также средств обеспечения безопасности при групповом применении РТК (установление «свой-чужой»; предупреждения столкновений; исключения взаимных повреждений и др.);

– низкая скрытность, защищенность и пропускная способность каналов связи и управления РТК (возможность перехвата управления («спуфинг»); искажения информации; дезинформирования и др.);

– недостаточная проработка программно-аппаратных средств (бортовых и наземных) для организации группового применения РТК (слабые вычислительные ресурсы; отсутствие специального ПО; невозможность реконфигурации под решаемую задачу; низкий темп обмена информации в группе; нереализованность управления в реальном масштабе времени);

– отсутствие интеллектуальных человеко-машинных интерфейсов управления групповым применением РТК (отсутствие средств формализации постановки задачи и доведения человеком-оператором приказов до РТК; непроработанность удобных и интуитивно понятных для человека-оператора способов «общения» с РТК и др.);

– низкая техническая оснащенность экспериментально-испытательной базы для проведения проверок и испытаний группового применения РТК (отсутствие специализированных средств измерений; подыгрыша сценариев применения; средств контроля, оценки результатов применения и др.).

Особого внимания при групповом применении РТК заслуживают вопросы управления для обеспечения слаженных действий в интересах эффективного достижения поставленных перед группой целей. В отличие от управления одиночными РТК управление группой имеет свои особенности, основными из которых являются следующие:

– большая размерность объекта управления;

– высокая сложность интеллектуальных методов управления [7];

– временные ограничения на выработку решения;

– удаленность объекта управления;

– многовариантность решений;

– многофакторность условий;
– оперативная реконфигурируемость эргономических свойств [11] группы РТК;
– многокритериальность управления;
– априорная неопределенность условий;
– трудоемкость выработки решений.

Перечисленные особенности группового управления РТК требуют применения качественно новых формальных средств моделирования, обеспечивающих автоматизацию данного процесса и построение системы группового управления в виде многоуровневой иерархической структуры, включающей организационный (групповой, тактический) уровень, функциональный (индивидуальный поведенческий) уровень и операционный (исполнительный) уровень.

Вопросы группового управления РТК требуют отдельного, более детального рассмотрения, прежде всего, соответствующих обеспечивающих технологий, в частности, технологий построения (конструирования) и технологий применения (использования) РТК.

В качестве основных направлений развития технологий РТК в обеспечение их группового применения предлагаются следующие:
– повышение уровня автономности РТК;
– развитие средств обеспечения безопасности группового применения РТК;
– разработка тактики и сценариев группового применения РТК;
– унификация и стандартизация интерфейсов взаимодействия РТК;
– увеличение скрытности и устойчивости каналов связи и управления РТК;
– уточнение понятийного аппарата и тактики группового применения РТК;
– расширение возможностей интерфейсов «оператор – группа РТК»;
– разработка методического обеспечения и создание технических средств для экспериментально-испытательной базы проведения проверок, испытаний и оценки эффективности группового применения РТК.

В заключение следует отметить, что в качестве ожидаемого эффекта группового применения РТК будет обеспечено:
– распределенное наблюдение за сложными объектами в труднодоступной, неконтролируемой области пространства;
– одновременное слежение за крупными важными объектами с разных ракурсов;
– параллельное и разнофукнциональное воздействие на цель;
– мультипликация ресурсов малоресурсных РТК;
– оперативное выполнение масштабных миссий.

Выводы

Групповое применение роботов открывает новые перспективы в роботизации различных отраслей. Становится возможным применение кардинально отличных сценариев применения роботов и решения различных технологических задач.

Одновременно важно признать, что применение роботов в группе предъявляет новые требования к функциональным возможностям самих роботов, а также требует переосмысления подхода к созданию новых образцов РТК.

Часть работы над данным материалом выполнена при поддержке Программы №29 Президиума РАН "Актуальные проблемы робототехнических систем".

1. Попов И.М., Хамзатов М.М. Война будущего: Концептуальные основы и практические выводы. Очерки стратегической мысли. – 2-е изд., испр. – М.: Кучково поле, 2017.
2. Хрипунов С.П., Васильев С.В., Благодарящев И.В. Методический подход к синтезу интеллектуальной информационно-управляющей системы группового применения робототехнических комплексов военного назначения // Москва: Радиотехника, Информационно-измерительные и управляющие системы, №2, т. 15, 2017.
3. Буравлев А.И., Русанов И.П. Модель оценки эффективности боевых систем // Военная мысль, 2009, №5.

4. Ермолов И.Л., Актуальные вопросы группового применения РТК, Труды второй Военно-научной конференции «Роботизация Вооруженных Сил Российской Федерации», Москва, 2017. - 1 эл. опт. диск (CD-ROM).
5. Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. – М.: Физматлит, 2009. – 278 с.
6. Каляев И. А., Шеремет И. А., Военная робототехника: выбор пути, Мехатроника, Автоматизация, Управление №2, 2008.
7. В.М. Лохин, С.В. Манько, Р.И. Александрова, С.А.К. Диане, А.С. Панин. Механизмы интеллектуальных обратных связей, обработки знаний и самообучения в системах управления автономными роботами и мультиагентными робототехническими группировками / Мехатроника, автоматизация, управление №8. Том 16. 2015.
8. Ермолов И.Л., Автономность мобильных роботов, её меры и пути её повышения. "Мехатроника, автоматизация, управление" №6, 2008.
9. Буренок В.М., Ляпунов В.М., Мудров В.И.. Теория и практика планирования и управления развитием вооружения. Под ред. А.М. Московского. М., Изд. «Вооружение. Политика. Конверсия», 2004, - 419 с.
10. Шляхов Н.Е., Ватаманюк И.В., Ронжин А.Л., Обзор методов и алгоритмов агрегации роя роботов. http://elibrary.ru/item.asp?id=28116867 (дата обращения: 09.03.2017).
11. Ермолов И.Л., Повышение эффективности манипуляторов роботов путём оптимизации расположения траекторий в рабочей зоне, в книге: 10-я Всероссийская мультиконференция по проблемам управления (МКПУ-2017) Материалы 10-й Всероссийской мультиконференции в 3-х томах. Ответственный редактор: И.А. Каляев. 2017. С. 265-267. ISBN: 978-5-9275-2429-7 (Т. 2)
12. Ермолов ИЛ., Кононов А.Ф., Хрипунов СП., Направления унификации робототехнических комплексов военного, специального и двойного назначения, Тезисы "Экстремальная робототехника -2017".
13. Ermolov I.L., Hierarchical Data Fusion Architecture for Unmanned Vehicles, in Smart Electromechanical Systems: The Central Nervous System, Springer, 2017.
14. Ермолов ИЛ., Хрипунов СП., Благодарящее И.В., Хрипунов С.С., Типовая структурно-функциональная схема робототехиических комплексов военного назначения, Информационно-измерительные и управляющие системы, №6, 2017.
15. В.Г. Градецкий, И.Л. Ермолов, М.М. Князьков, С.А. Собольников, Построение подвижных коммуникационных сетей на базе наземных автономных мобильных роботов, "Мехатроника. Автоматизация. Управление", № 11, 2011.
16. Рубцов И.В. Вопросы состояния и перспективы развития отечественной наземной робототехники военного и специального назначения // Известия ЮФУ. Технические науки. 2013. № 3(140). С. 14–20.
17. Чобиток В. А. Оценка боевой эффективности и технического совершенства вооружения и военной техники. Учебное пособие. — К.: КВТИУ, 1984. — 58 с.
18. Иванов Д.Я., Методы построения пространственных формаций в группах беспилотных летательных аппаратов типа квадрокоптеров : автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.02.05 / Иванов Донат Яковлевич; [Место защиты: Юж. федер. ун-т]. - Таганрог, 2016. - 23 с.

O.M. Kapustina

MANIPULABILITY AND MOTION PLANNING OF ROBOT KUKA YOUBOT

National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow,
KapustinaOM@mpei.ru

Annotation

In this work the results of the analytical study of KUKA youBot manipulability $w=\sqrt{\det\left(\mathbf{J}\mathbf{J}^T\right)}$, $\mathbf{J}$ – the Jacobi matrix of mapping the eight-dimensional space of generalized coordinates of a system consisting of the platform and the robot's arm in the six-dimensional space of the location parameters of its end effector are presented. The form of the dependence of *w* on the generalized coordinates is established, configurations of maximum manipulability are found, requirements are formulated for the control law of the robot motion, keeping the high manipulability with a given law of the end-effector motion are found.

Key words: mobile manipulator, manipulability, motion planning, KUKA youBot.

Manipulability *w* [1] characterizes the values of the velocities with which the end-effector can move in different positions of the robot. Configurations of maximum manipulability in which *w* reaches its maximum value are interesting. In singular configurations, manipulability is equal to 0. In many applications [2, 3] it is required the robot control to maintain high manipulability. In the present paper, manipulability [1] refers to the $w=\sqrt{\det\left(\mathbf{J}\mathbf{J}^T\right)}$, $\mathbf{J}$ - Jacobi matrix of the mapping of the space of robot generalized coordinates in the six-dimensional space of the location parameters of its end-effector, *T* is the sign of transposition. Manipulability *w* is a nonlinear function of generalized coordinates of the robot and its analysis is a complex problem, solved in many cases numerically. Analytical investigation has been carried out for simple mechanisms [2, 4].

The mobile manipulator KUKA youBot [5], intended for use in educational and research purposes is considered here. In [6, 7] the manipulability of this robot was obtained by numerical methods. In this paper we present the results of studying the properties of *w* in an exact analytical way. The established nature of the *w* dependence of the robot generalized coordinates made it possible to determine the requirements for the control law of the robot in order to maintain the maximum manipulability.

The robot KUKA youBot in fig. 1 is a platform with four omnidirectional motions mekanum wheels, on which a five-axis manipulator with a gripper is mounted. The manipulator consists of five serially connected links attached by revolute joints to the platform and to each other. Link 1 – a rigid body, rotating around the vertical axis C_1Z_1, the point C_1 belongs to the base of the platform, links 2, 3, 4 – rods that rotate around the horizontal axes passing through the points C_2, C_3, C_4, respectively. Link 5 – a rigid body, a palm (the segment C_5C_5' of the axis C_5z), rotates around the axis C_5z, directed along link 4. The gripper of the manipulator in the form of two fingers that can translationally move relative to link 5 is connected to link 5 at the point C_5', the point *E* of the axis C_5z is the boundary point of the gripper with closed fingers. The platform is a rigid body with a horizontal top base. Links 1-4 and the axis of rotation of link 5 are located in the same vertical plane.

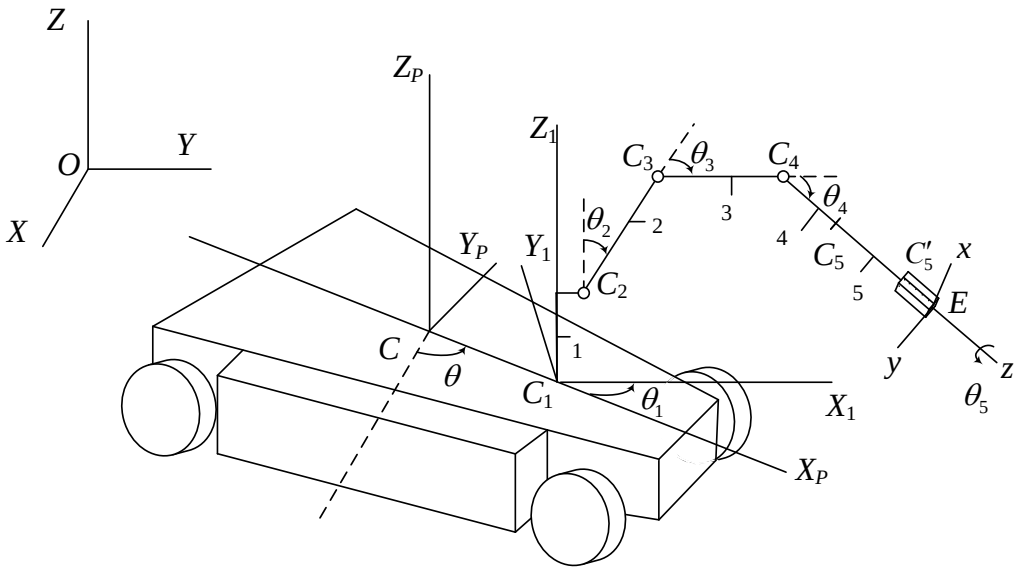


Figure 1 – The scheme of the mobile manipulator KUKA youBot

We introduce coordinate systems: *OXYZ* – fixed, absolute, the *OZ* axis is vertical, the *OXY* plane coincides with the plane of the top platform base; $CX_PY_PZ_P$ – rigidly connected to the platform, *C* - the point of the top platform base, the CZ_P axis is vertical; *Exyz* – rigidly connected to the gripper, rotates around the axis C_5z; $C_1X_1Y_1Z_1$ – rotates around the vertical C_1Z_1 axis together with link 1, the C_1X_1 axis is directed from C_1Z_1 axis to the projection of the point C_2 onto *OXY* plane.

We denote by: *h* – the distance between the points *C* and C_1; a_1 – the distance between the point C_1 and the projection of the point C_2 onto the horizontal plane; d_1 – the distance between the point C_1 and the projection of the point C_2 onto the axis C_1Z_1, $a_2 = \left|\overline{C_2C_3}\right|, a_3 = \left|\overline{C_3C_4}\right|, a_4 = \left|\overline{C_4C_5}\right|, a_5 = \left|\overline{C_5C_5'}\right|, a_6 = \left|\overline{C_5'E}\right|$. Hereinafter, the vectors are denoted by a line from above or a straight bold font. We will denote matrices by this font.

We define the position of the platform and the arms by generalized coordinates $X_C, Y_C, \theta, \theta_i, i = 1-5$, X_C, Y_C – the coordinates of the point *C* relative to the axes *OX*, *OY*, θ- the angle between the axes *OX* and CX_P, $0 \le \theta < 2\pi$, θ_1 – the angle between the axes CX_P и C_1X_1, θ_2 – the angle from the axis C_1Z_1 to $\overline{C_2C_3}$, θ_3 – the angle from $\overline{C_2C_3}$ to $\overline{C_3C_4}$, θ_4 – the angle from $\overline{C_3C_4}$ to $\overline{C_4C_5}$, θ_5 – the angle of rotation of link 5 around the axis C_5z.

In the *OXY*, C_1Z_1, *Exy* planes, the positive direction of the angle measuring is a counterclockwise direction, seen from the ends of the *OZ*, C_1Y_1, C_5z axes, respectively.

According to [5], constraints

$$-169^0 \le \theta_1 \le 169^0, -65^0 \le \theta_2 \le 90^0, -151^0 \le \theta_3 \le 146^0,$$
$$-102,5^0 \le \theta_4 \le 102,5^0, -167,5^0 \le \theta_5 \le 167,5^0. \quad (1)$$

must be satisfied.

The position of the gripper with respect to the *OXYZ* coordinate system is determined by the parameters of the gripper location, for which we take the coordinates $X_E, Y_E, Z_E$of the point *E* and the Euler angles $\psi, \theta_E, \varphi, 0 \le \psi < 2\pi, 0 \le \theta_E \le \pi, 0 \le \varphi < 2\pi$, defining the orientation of the basis of the coordinate system *Exyz* with respect to the basis of the coordinate system *OXYZ*.

The generalized coordinates of the robot are related to the location parameters of the end-effector in fig. 1 in accordance with the equations:

$$
\begin{aligned}
&X_E = X_C + h\cos\theta + \cos(\theta+\theta_1)\left[a_1 + a_2\sin\theta_2 + a_3\sin(\theta_2+\theta_3) + c\sin(\theta_2+\theta_3+\theta_4)\right],\\
&Y_E = Y_C + h\sin\theta + \sin(\theta+\theta_1)\left[a_1 + a_2\sin\theta_2 + a_3\sin(\theta_2+\theta_3) + c\sin(\theta_2+\theta_3+\theta_4)\right],\\
&Z_E = d_1 + a_2\cos\theta_2 + a_3\cos(\theta_2+\theta_3) + c\cos(\theta_2+\theta_3+\theta_4),\\
&\psi = \theta + \theta_1 \pm \frac{\pi}{2},\\
&\theta_E = \pm(\theta_2+\theta_3+\theta_4),\\
&\varphi = \theta_5 \pm \frac{\pi}{2},\\
&c = a_4 + a_5 + a_6.
\end{aligned}
\tag{2}
$$

To obtain numerical values of the Euler angles at the intervals indicated above, we should add to the values calculated by (2) the terms $2k\pi$, k is an integer.

The Jacobi matrix of the mapping

$$
\mathbf{X} = \mathbf{X}(\mathbf{Q}),
$$

$$
\mathbf{X} = \left(X_E, Y_E, Z_E, \psi, \theta_E, \varphi\right)^T, \mathbf{Q} = \left(X_C, Y_C, \theta, \theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5\right)^T,
$$

of the space of the robot's generalized coordinates into the space of the location parameters of the gripper has the form

$$
\mathbf{J} = \left(\frac{\partial \mathbf{X}}{\partial \mathbf{Q}}\right) = \begin{pmatrix}
1 & 0 & j_{13} & j_{14} & j_{15} & j_{16} & j_{17} & 0\\
0 & 1 & j_{23} & j_{24} & j_{25} & j_{26} & j_{27} & 0\\
0 & 0 & 0 & 0 & j_{35} & j_{36} & j_{37} & 0\\
0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0\\
0 & 0 & 0 & 0 & b & b & b & 0\\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1
\end{pmatrix},
$$

$$
\begin{aligned}
&j_{13} = -h\sin\theta - \sin(\theta+\theta_1)l,\\
&j_{14} = -\sin(\theta+\theta_1)l,\\
&j_{15} = \cos(\theta+\theta_1)\left[a_2\cos\theta_2 + a_3\cos(\theta_2+\theta_3) + c\cos(\theta_2+\theta_3+\theta_4)\right],\\
&j_{16} = \cos(\theta+\theta_1)\left[a_3\cos(\theta_2+\theta_3) + c\cos(\theta_2+\theta_3+\theta_4)\right],\\
&j_{17} = c\cos(\theta+\theta_1)\cos(\theta_2+\theta_3+\theta_4),\\
&j_{23} = h\cos\theta + \cos(\theta+\theta_1)l,\\
&j_{24} = \cos(\theta+\theta_1)l,\\
&j_{25} = \sin(\theta+\theta_1)\left[a_2\cos\theta_2 + a_3\cos(\theta_2+\theta_3) + c\cos(\theta_2+\theta_3+\theta_4)\right],\\
&j_{26} = \sin(\theta+\theta_1)\left[a_3\cos(\theta_2+\theta_3) + c\cos(\theta_2+\theta_3+\theta_4)\right],\\
&j_{27} = c\sin(\theta+\theta_1)\cos(\theta_2+\theta_3+\theta_4),\\
&j_{35} = -a_2\sin\theta_2 - a_3\sin(\theta_2+\theta_3) - c\sin(\theta_2+\theta_3+\theta_4),\\
&j_{36} = -a_3\sin(\theta_2+\theta_3) - c\sin(\theta_2+\theta_3+\theta_4),\\
&j_{37} = -c\sin(\theta_2+\theta_3+\theta_4),\\
&b = \pm 1,\\
&l = a_1 + a_2\sin\theta_2 + a_3\sin(\theta_2+\theta_3) + c\sin(\theta_2+\theta_3+\theta_4).
\end{aligned}
$$

We construct the manipulability function

$$w=\sqrt{\det\left(\mathbf{J}\mathbf{J}^T\right)}=\sqrt{f}=\sqrt{1/4\left(4a_3^2\left(2+h^2\right)+a_2^2\left(4\left(2+h^2\right)+a_3^2\left(4+h^2\right)\right)-\right.}$$
$$\sqrt{-4a_2^2\left(2+h^2\right)\cos 2\theta_2-a_3\left(-4a_2\left(2+h^2\right)\cos\theta_3+a_2^2a_3\left(4+h^2\right)\cos 2\theta_3+\right.} \quad (3)$$
$$\left.\sqrt{+4\left(2+h^2\right)\left(a_3\cos 2\left(\theta_2+\theta_3\right)+a_2\cos\left(2\theta_2+\theta_3\right)\right)-2a_2^2a_3h^2\cos 2\theta_1\sin^2\theta_3\right)\Big).}$$

As it can be seen from (3), w depends only on the three generalized coordinates of the robot arm $\theta_1,\theta_2,\theta_3$.

To find the configuration of the highest manipulability, we find the maximum value of the positive semi-definite function [1] over the region (1). It follows from (3) that f reaches the maximum at $\theta_1=0$.

In accordance with [5], we take the following numerical values of the parameters:

h=151 mm, d_1=147 mm, a_1=33 mm, a_2=155 mm, a_3=135 mm, a_4=81 mm, a_5=90 mm, a_6=47 mm. (4)

Fig. 2 shows a plot of the function $f\left(0,\theta_2,\theta_3\right)$ in the region (1).

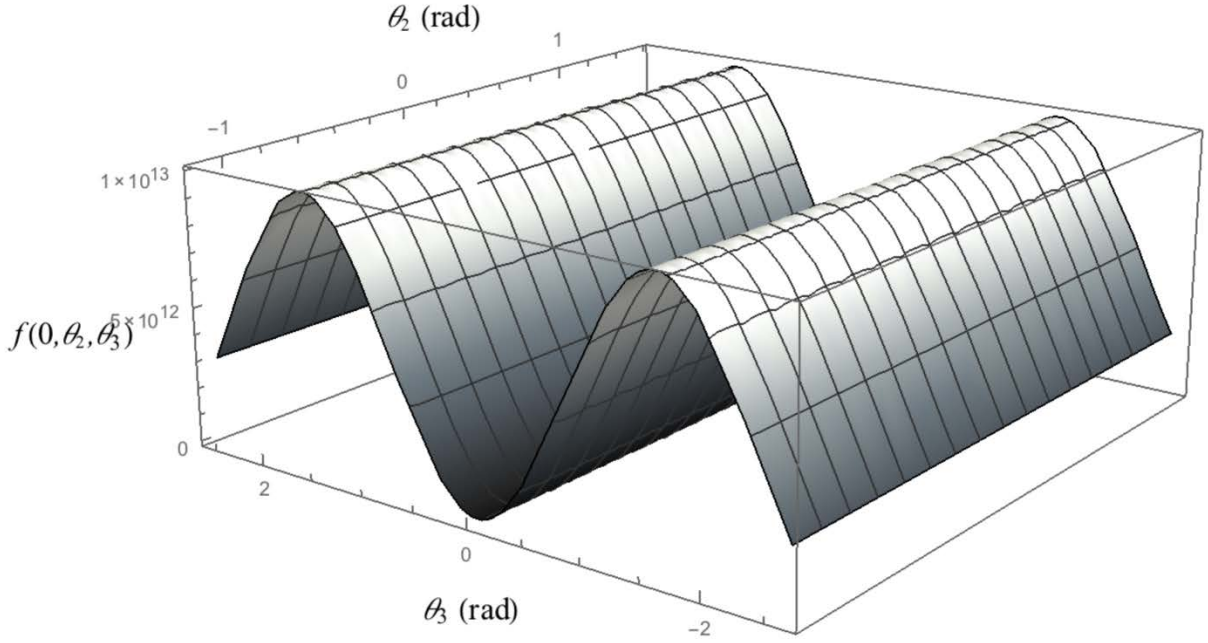


Figure 2 – A plot of the function $f\left(0,\theta_2,\theta_3\right)$

Write the equations to find the stationary points of the function $f\left(0,\theta_2,\theta_3\right)$

$$\frac{\partial f}{\partial\theta_2}=2\left(2+h^2\right)\left(a_2^2\sin 2\theta_2+a_3\left(a_3\sin 2\left(\theta_2+\theta_3\right)+a_2\sin\left(2\theta_2+\theta_3\right)\right)\right)=0,$$
$$\frac{\partial f}{\partial\theta_3}=a_3\left(2+h^2\right)\left(a_2^2a_3\sin 2\theta_3-a_2\sin\theta_3+2a_3\sin 2\left(\theta_2+\theta_3\right)+a_2\sin\left(2\theta_2+\theta_3\right)\right)=0. \quad (5)$$

On the coordinate plane of the variables θ_2,θ_3 each of the equations (5) determines the curves shown in fig.3.

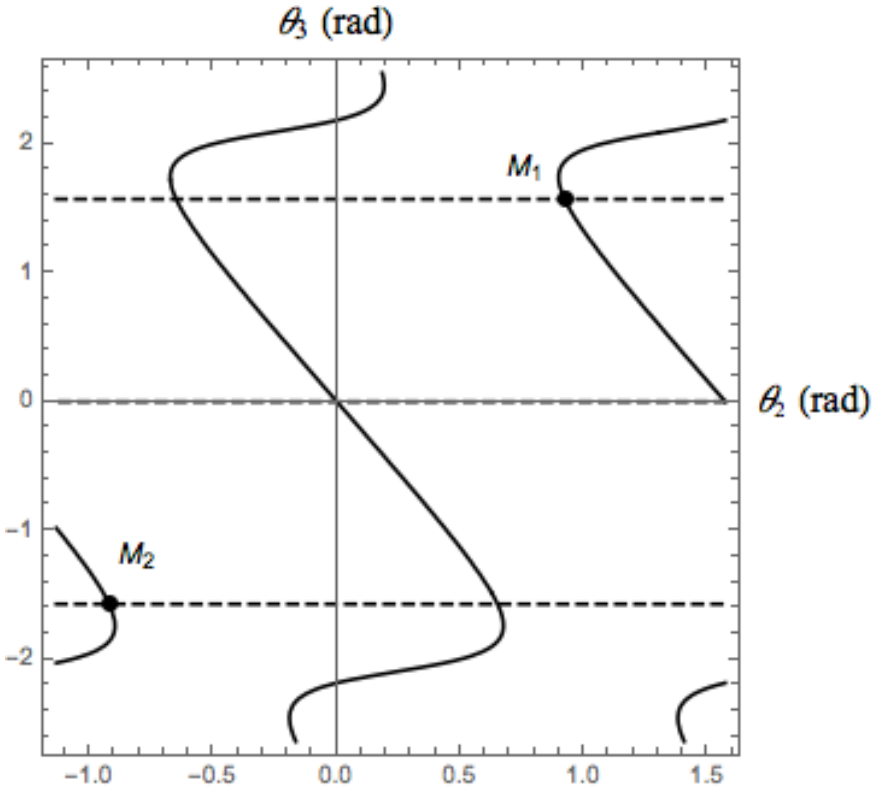


Figure 3 – Curves defined by the first (solid lines) and the second (dashed lines) equation (5)

The system of equations (5) admits an exact analytic solution with respect to θ_2, θ_3. These solutions form the set *K* of points of intersection of the curves in fig. 3:

$$K = \{(\theta_2, \theta_3\} : (0;0), (\pi/2;0), (\pm 0{,}6502; \quad 1{,}5708), (\pm 0{,}9206, \pm 1{,}5707)\}.$$

Analysis of second-order derivatives of the function $f\left(0, \theta_2, \theta_3\right)$ shows that $\left(0;0\right)$ is the point of its local minimum, and $M_1(0{,}9206, 1{,}5707), M_2(-0{,}9206, -1{,}5707)$ are the local maximum points.

The study of the maximum values of the function $f\left(0, \theta_2, \theta_3\right)$ on the boundaries of the region (1) makes it possible to obtain exact results in an analytic form, since one reduces to an analysis of the properties of elementary functions of one variable. From the comparison of the maximum values of $f\left(0, \theta_2, \theta_3\right)$ obtained at the boundaries of the region (1) and at the local maximum points, it follows that $f\left(0, \theta_2, \theta_3\right)$ reaches the maximum value in the region (1) at the points M_1, M_2. Functions $f(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ and $w(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ have the maximum values $f_{\max}, w_{\max}$ at points $P_1(0;0{,}9206;1{,}5707), P_2(0;-0{,}9206;-1{,}5707)$. These values are equal to

$$f_{\max} = 9{,}98588 \cdot 10^{12}, w_{\max} = 3{,}16004 \cdot 10^{6}.$$

Fig. 4, fig. 5 show the robot KUKA youBot in the configurations corresponding to the points P_1, P_2.

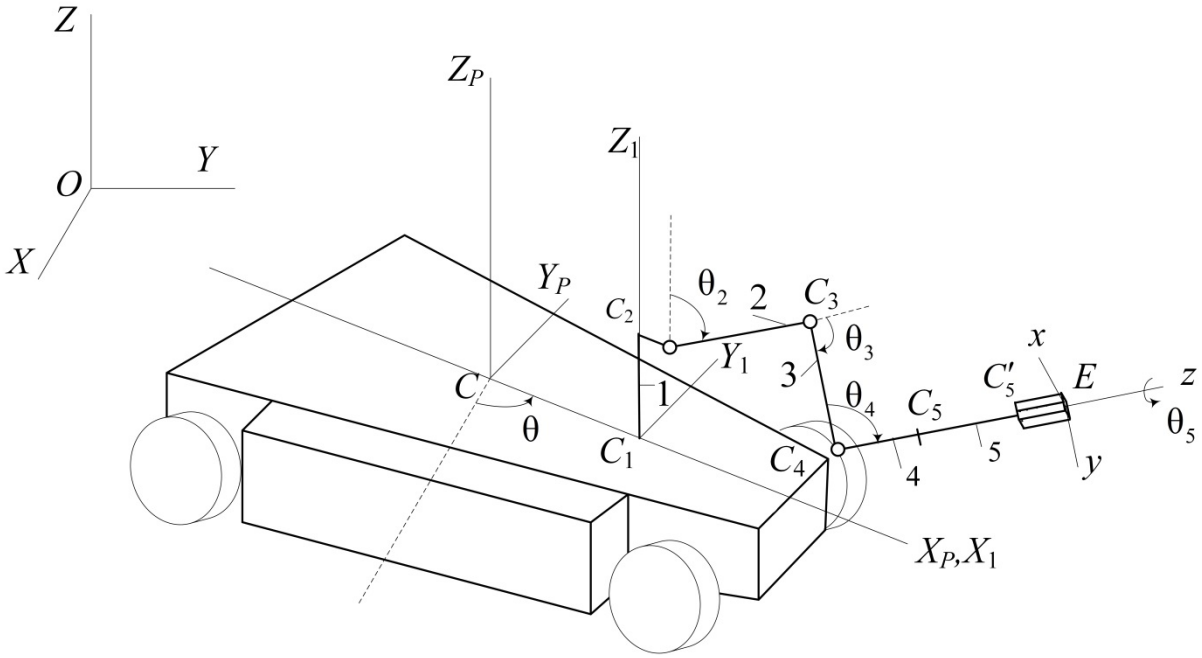


Figure 4 – KUKA youBot in the configuration corresponding to the point $P_1(0;0{,}9206;1{,}5707)$

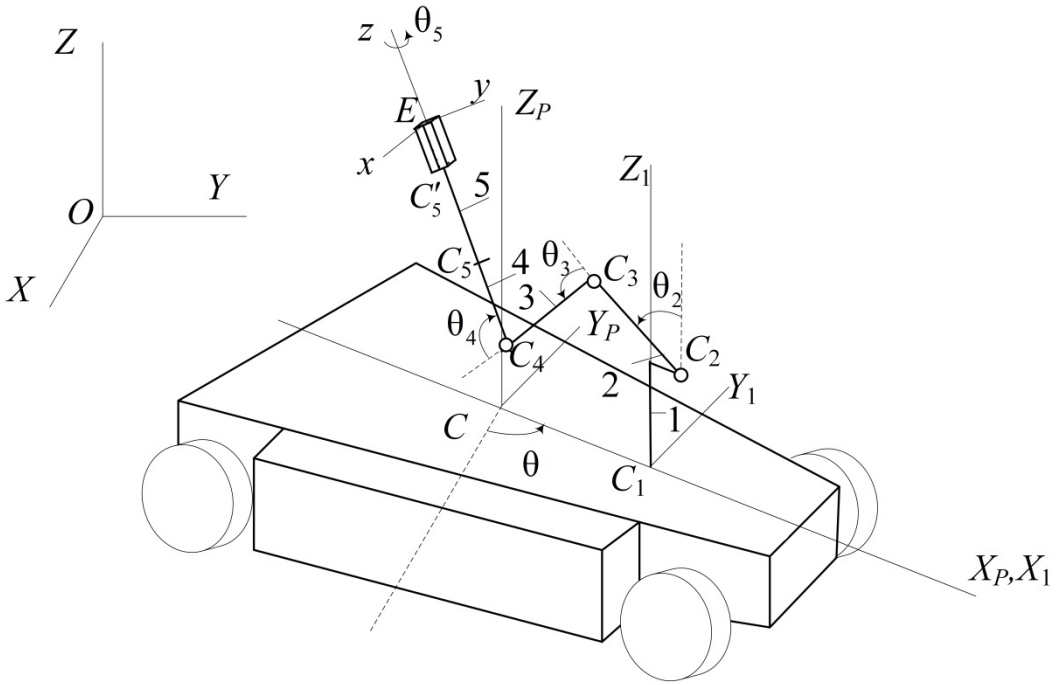


Figure 5 - KUKA youBot in the configuration corresponding to the point $P_2(0;-0{,}9206;-1{,}5707)$

It should be noted that the configuration $\theta_2 = \theta_3 = 0$ is singular, i.e. $w(\theta_1, 0, 0) = 0$.

We consider the question of controlling the robot in order to maintain the highest manipulability with a given law of motion of the end-effector.

KUKA youBot is a kinematically redundant mechanism. For a known vector $\mathbf{X}_d = \left(X_{Ed}, Y_{Ed}, Z_{Ed}, \psi_d, \theta_{Ed}, \varphi_d\right)^T$ determining the desired position of the end-effector with respect to the *OXYZ* coordinate system, there are infinitely many solutions of the inverse kinematics problem [6, 9]. An additional condition for obtaining maximum manipulability allows to choose one of these solutions and accept it as desired.

We denote

$$\theta_{1d} = 0, \theta_{2d} = \pm 0{,}9206, \theta_{3d} = \pm 1{,}5707. \tag{6}$$

numerical values of angles in the configuration of the maximum manipulability. From equations (2), after substituting (6), we find the solution of the inverse kinematics problem

$$\begin{aligned}
&X_{Cd} = X_{Ed} - \cos\theta_d \left[h + a_1 + a_2 \sin\theta_{2d} + a_3 \sin\left(\theta_{2d} + \theta_{3d}\right) \pm c \sin\theta_{Ed} \right], \\
&Y_{Cd} = Y_{Ed} - \sin\theta_d \left[h + a_1 + a_2 \sin\theta_{2d} + a_3 \sin\left(\theta_{2d} + \theta_{3d}\right) \pm c \sin\theta_{Ed} \right], \\
&\theta_d = \psi_d \mp \frac{\pi}{2}, \\
&\theta_{4d} = \theta_{Ed} \mp \left(\theta_{2d} + \theta_{3d}\right), \\
&\theta_{5d} = \varphi_d \mp \frac{\pi}{2}.
\end{aligned} \tag{7}$$

$X_{Cd}, Y_{Cd}, \theta_d, \theta_{4d}, \theta_{45}$ – the desired values of the coordinates $X, Y, \theta, \theta_4, \theta_5$, respectively.

We note that the value θ_{4d} obtained in (7) may not satisfy (1). In this case, it is impossible to fulfill the conditions (6), and we must solve the problem of finding the maximum value of *w* with respect to variables $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ with simultaneous fulfillment of constraints (1).

Planning the motion of the robot, which keeps the maximum manipulability, is implemented in accordance with the following algorithm:

1. Set the desired position of the end-effector $\mathbf{X}_d = \left(X_{Ed}, Y_{Ed}, Z_{Ed}, \psi_d, \theta_{Ed}, \varphi_d\right)^T$.

2. Calculate θ_{4d} by (7) and verify the validity of (1) for θ_{4d}.

3. If (1) is satisfied with respect to θ_{4d}, then find the desired values of the generalized coordinates of the robot $X_{Cd}, Y_{Cd}, \theta_d, \theta_{1d}, \theta_{2d}, \theta_{3d}, \theta_{5d}$ by (6), (7).

4. If (1) is not satisfied with respect to θ_{4d}, then determine $\theta_{1d}, \theta_{2d}, \theta_{3d}$ by finding the maximum value of *w* with constraints (1).

5. Follow steps 1-4 for all desired positions of the end-effector.

As an example, we find the desired robot motion, which ensures the keeping of the configuration of the maximum manipulability (6), provided that the point *E* of the robot's end-effector passes through three points of a sinusoid $Y = 30 \sin X$ located in the horizontal plane. We also require that the end-effector should move translationally, the *Ez* axis should be directed vertically downward, and the angles ψ, φ kept constant values equal to $\pi/2$ and 0, respectively. We choose for certainty the configuration of the arm of the robot, corresponding to the signs plus in (6).

In this case, the set of desired vectors $\mathbf{X}_d$ consists of three elements, to which the three desired vectors $\mathbf{Q}_d$ of the generalized coordinates of the robot, found by (6), (7), correspond. Tab.1 shows the coordinates of the vectors $\mathbf{X}_d, \mathbf{Q}_d$ (linear dimensions are given in mm, angles in radians).

From the tab. 1 it can be seen that the platform motion, keeping the maximum manipulability, is a translational motion in which the point *C* of the platform describes the sinusoid

$$Y_{Cd} = 30 \sin\left(X_{Cd} - h - a_1 - a_2 \sin\theta_{2d} - a_3 \sin\left(\theta_{2d} + \theta_{3d}\right)\right)$$

in the horizontal *OXY* plane.

Table 1. The desired vectors $\mathbf{X}_d, \mathbf{Q}_d$

$\mathbf{X}_d$						$\mathbf{Q}_d$							
X_{Ed}	Y_{Ed}	Z_{Ed}	ψ_d	θ_{Ed}	φ_d	X_{Cd}	Y_{Cd}	θ_d	θ_{1d}	θ_{2d}	θ_{3d}	θ_{4d}	θ_{5d}
0	0	-84,624	$\pi/2$	π	0	-389,103	0	0	0	0,9206	1,5707	0,65	$-\pi/2$
$\pi/6$	15	-84,624	$\pi/2$	π	0	-388,58	15	0	0	0,9206	1,5707	0,65	$-\pi/2$
$\pi/2$	30	-84,624	$\pi/2$	π	0	-387,532	30	0	0	0,9206	1,5707	0,65	$-\pi/2$

Obtained in the paper the analytic expression of manipulability (3) KUKA youBot, taking into account the mobility of the platform, and the configuration (6) of the maximum manipulability allow to determine the algorithm for constructing the desired motion of the robot, ensuring the high manipulability in the process of executing a task by the end-effector. The presented results can be applied in education and research in solving various theoretical and applied problems.

The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, the project № 16-01-00429 A.

1. Yoshikawa T. Manipulability of Robot Mechanisms // The International Journal Robotics Research, Vol. 4, 1985, pp. 3-9.
2. Yamamoto Y., Yun X. Coordinating locomotion and manipulation of a mobile manipulator // IEE Trans Automatic Control 1984; 6: 1326-1332.
3. Nagatani K., Hirayama T., Gofuku A., Tanaka Y. Motion planning for Mobile Manipulator with keeping Manipulability // IROS 2002, pp.1663-1668, Lausane, Switzerland, October 2002.
4. Bayle B., Fourquet J.Y., Renaud M. Manipulability of Wheeled Mobile Manipulators: Application to Motion Generation // Int. J. Robotics Research Vol.22 (7-8), pp. 565-581, 2003.
5. http://www.youbot-store.com/
6. Sharma S., Kraetzschmar G., Scheurer C. Unified Closed Form Inverse Kinematics for the KUKA youBot // Proceedings of ROBOTIK / 7-th German Conference on Robotics, 2012. P. 1-6.
7. Avanzini G. Buizza, Zanchettin A. M. , Rocco P. Reactive Constrained Model Predictive Control for Redundant Mobile Manipulators // Proceedings of the 13th International Conference Intelligent Autonomous Systems, IAS-13 (Springer International Publishing 2016) pp. 1301–1314.
8. Patrinostro S., Tanzini M., Satler M., Ruffaldi E., Filippeschi A., Avizzano C. A. A haptic-assisted guidance system for working machines based on virtual force fields // Information Communication and Automation Technologies (ICAT) 2015 XXV International Conference on, pp. 1-6, 2015.
9. Kapustina O.M. An analitical solution of the inverse kinematics problem of KUKA youBot, parameterized by generalized coordinates of its platform // EXTREME ROBOTICS // Proceedings of the International Scientific and Technological Conference. Saint-Petersburg: Compani Ltd Politehnika print, 2017. P. 42-47.

О.М. Капустина

МАНИПУЛЯТИВНОСТЬ РОБОТА KUKA YOUBOT И ПЛАНИРОВАНИЕ ЕГО ДВИЖЕНИЙ

Национальный исследовательский университет
“Московский энергетический институт”, Москва
KapustinaOM@mpei.ru

Аннотация

В работе приведены результаты аналитического исследования манипулятивности KUKA youBot $w = \sqrt{\det\left(\mathbf{J}\mathbf{J}^T\right)}, \mathbf{J}$ - матрица Якоби отображения восьмимерного пространства обобщённых координат системы, состоящей из платформы и руки робота, в шестимерное пространство параметров локации его рабочего органа. Установлен характер зависимости *w* от обобщённых координат, найдены конфигурации наибольшей манипулятивности, сформулированы требования к закону управления движением робота, обеспечивающим сохранение высокой манипулятивности при заданном законе движения рабочего органа.

Ключевые слова: мобильный манипулятор, манипулятивность, планирование движений, KUKA youBot.

Манипулятивность w [1] характеризует величины скоростей, с которыми в различных положениях робота способен двигаться его рабочий орган. Интерес представляют собой конфигурации наибольшей манипулятивности, в которых w достигает максимального значения. В сингулярных конфигурациях манипулятивность равна нулю. Во многих прикладных задачах [2, 3] требуется обеспечить управление роботом с целью поддержания высокой манипулятивности. В настоящей работе под манипулятивностью [1] понимается функция $w = \sqrt{\det\left(\mathbf{J}\mathbf{J}^T\right)}$, $\mathbf{J}$- матрица Якоби отображения пространства обобщённых координат робота в шестимерное пространство параметров локации его рабочего органа, T - знак транспонирования. Манипулятивность w есть нелинейная функция обобщённых координат робота и её анализ представляет собой сложную задачу, решаемую во многих случаях численно. Аналитическое исследование удаётся провести лишь для простых механизмов [2, 4].

Здесь рассматривается мобильный манипулятор KUKA youBot [5], предназначенный для использования в образовательных и исследовательских целях. В [6, 7] манипулятивность этого робота определялась численными методами. В настоящей статье представлены результаты изучения свойств функции w точным аналитическим способом. Установленный характер зависимости w от обобщённых координат робота позволил определить требования к закону управления роботом с целью поддержания наибольшей манипулятивности.

Робот KUKA youBot на рис. 1 представляет собой платформу с четырьмя меканум колёсами всенаправленного движения, на которой установлен пятиосный манипулятор со схватом.

Манипулятор состоит из пяти последовательно соединённых звеньев, связанных соединениями вращательного типа с платформой и между собой. Звено 1 – твёрдое тело, вращающееся вокруг вертикальной оси C_1Z_1, точка C_1 принадлежит основанию платформы, звенья 2, 3, 4 – стержни, которые вращаются вокруг горизонтальных осей, проходящих через точки C_2, C_3, C_4 соответственно. Звено 5 – твердое тело, ладонь (отрезок C_5C_5' оси C_5z), вращается вокруг оси C_5z, направленной вдоль звена 4. Схват манипулятора в виде двух пальцев, которые могут перемещаться поступательно относительно звена 5, соединён со звеном 5 в точке C_5', точка E на оси C_5z – крайняя точка схвата при сомкнутых пальцах. Платформа – твёрдое тело с горизонтальным верхним основанием. Звенья 1 – 4 и ось вращения звена 5 расположены в одной вертикальной плоскости.

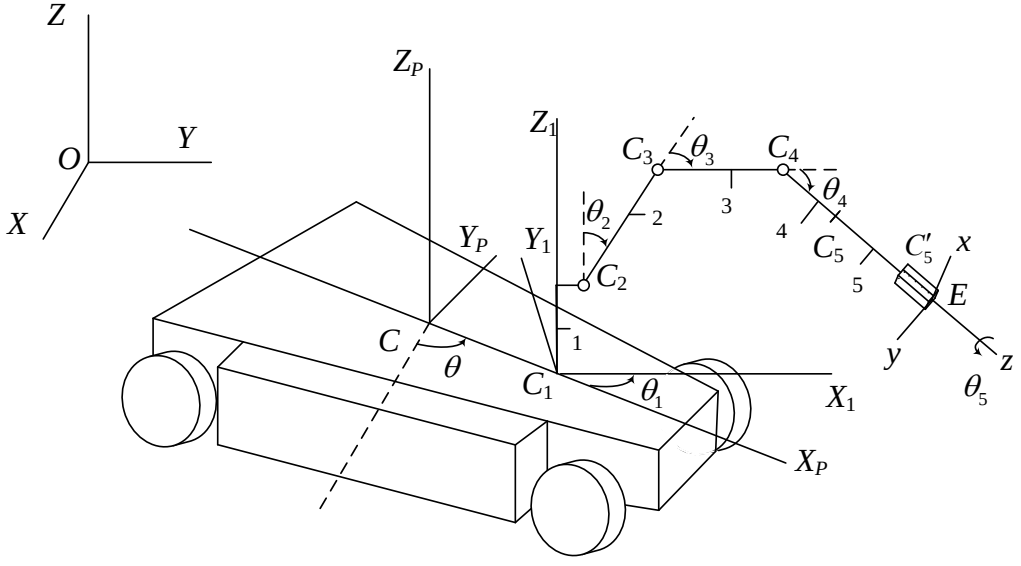


Рисунок 1– Схема мобильного манипулятора KUKA youBot

Введём системы координат: $OXYZ$ – неподвижная, абсолютная, ось OZ вертикальна, плоскость OXY совпадает с плоскостью верхнего основания платформы; $CX_PY_PZ_P$ – жёстко связанная с платформой, C – точка верхнего основания платформы, ось CZ_P вертикальна; $Exyz$ – жёстко связанная

со схватом, вращается вокруг оси C_5z; $C_1X_1Y_1Z_1$ – вращается вокруг вертикальной оси C_1Z_1 вместе со звеном 1, ось C_1X_1 направлена от оси C_1Z_1 к проекции точки C_2 на плоскость OXY.

Обозначим: h – расстояние между точками C и C_1; a_1 – расстояние между точкой C_1 и проекцией точки C_2 на горизонтальную плоскость; d_1 – расстояние между точкой C_1 и проекцией точки C_2 на ось C_1Z_1, $a_2 = \left|\overline{C_2C_3}\right|, a_3 = \left|\overline{C_3C_4}\right|, a_4 = \left|\overline{C_4C_5}\right|, a_5 = \left|\overline{C_5C_5'}\right|, a_6 = \left|\overline{C_5'E}\right|$. Здесь и далее векторы обозначены чертой сверху или прямым полужирным шрифтом. Этим же шрифтом будем обозначать матрицы.

Положение платформы и руки определим обобщёнными координатами $X_C, Y_C, \theta, \theta_i, i = 1-5$, X_C, Y_C– координаты точки C относительно осей OX, OY, θ – угол между осями OX и CX_P, $0 \le \theta < 2\pi$, θ_1 – угол между осями CX_P и C_1X_1, θ_2 – угол от оси C_1Z_1 до $\overline{C_2C_3}, \theta_3$ – угол от $\overline{C_2C_3}$ до $\overline{C_3C_4}, \theta_4$ – угол от $\overline{C_3C_4}$ до $\overline{C_4C_5}$, θ_5 – угол поворота звена 5 вокруг C_5z.

В плоскостях OXY, C_1Z_1, Exy положительным направлением отсчёта углов является направление против часовой стрелки, если смотреть из концов осей OZ, C_1Y_1, C_5z, соответственно.

Согласно [5] должны выполняться ограничения:

$$\begin{aligned} &-169^0 \le \theta_1 \le 169^0, -65^0 \le \theta_2 \le 90^0, -151^0 \le \theta_3 \le 146^0, \\ &-102,5^0 \le \theta_4 \le 102,5^0, -167,5^0 \le \theta_5 \le 167,5^0. \end{aligned} \tag{1}$$

Положение схвата относительно системы координат $OXYZ$ определим параметрами локации схвата, за которые примем координаты X_E, Y_E, Z_E точки E и углы Эйлера $\psi, \theta_E, \varphi, 0 \le \psi < 2\pi, 0 \le \theta_E \le \pi, 0 \le \varphi < 2\pi$, задающие ориентацию базиса системы координат $Exyz$ относительно базиса системы координат $OXYZ$.

Обобщённые координаты робота связаны с параметрами локации рабочего органа рис. 1 соотношениями:

$$\begin{aligned} X_E &= X_C + h\cos\theta + \cos(\theta + \theta_1)\left[a_1 + a_2\sin\theta_2 + a_3\sin(\theta_2 + \theta_3) + c\sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4)\right], \\ Y_E &= Y_C + h\sin\theta + \sin(\theta + \theta_1)\left[a_1 + a_2\sin\theta_2 + a_3\sin(\theta_2 + \theta_3) + c\sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4)\right], \\ Z_E &= d_1 + a_2\cos\theta_2 + a_3\cos(\theta_2 + \theta_3) + c\cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4), \\ \psi &= \theta + \theta_1 \pm \frac{\pi}{2}, \\ \theta_E &= \pm(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4), \\ \varphi &= \theta_5 \pm \frac{\pi}{2}, \\ c &= a_4 + a_5 + a_6. \end{aligned} \tag{2}$$

Для получения числовых значений углов Эйлера на указанных выше интервалах следует добавить к их значениям, вычисляемым по (2), слагаемые $2k\pi$, k – целое число.

Матрица Якоби отображения

$$\mathbf{X} = \mathbf{X}(\mathbf{Q}),$$

$$\mathbf{X} = \left(X_E, Y_E, Z_E, \psi, \theta_E, \varphi\right)^T, \mathbf{Q} = \left(X_C, Y_C, \theta, \theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5\right)^T,$$

пространства обобщённых координат робота в пространство параметров локации схвата имеет вид

$$\mathbf{J} = \left(\frac{\partial \mathbf{X}}{\partial \mathbf{Q}}\right) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & j_{13} & j_{14} & j_{15} & j_{16} & j_{17} & 0 \\ 0 & 1 & j_{23} & j_{24} & j_{25} & j_{26} & j_{27} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & j_{35} & j_{36} & j_{37} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & b & b & b & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$j_{13} = -h\sin\theta - \sin(\theta+\theta_1)l,$$
$$j_{14} = -\sin(\theta+\theta_1)l,$$
$$j_{15} = \cos(\theta+\theta_1)\left[a_2\cos\theta_2 + a_3\cos(\theta_2+\theta_3) + c\cos(\theta_2+\theta_3+\theta_4)\right],$$
$$j_{16} = \cos(\theta+\theta_1)\left[a_3\cos(\theta_2+\theta_3) + c\cos(\theta_2+\theta_3+\theta_4)\right],$$
$$j_{17} = c\cos(\theta+\theta_1)\cos(\theta_2+\theta_3+\theta_4),$$
$$j_{23} = h\cos\theta + \cos(\theta+\theta_1)l,$$
$$j_{24} = \cos(\theta+\theta_1)l,$$
$$j_{25} = \sin(\theta+\theta_1)\left[a_2\cos\theta_2 + a_3\cos(\theta_2+\theta_3) + c\cos(\theta_2+\theta_3+\theta_4)\right],$$
$$j_{26} = \sin(\theta+\theta_1)\left[a_3\cos(\theta_2+\theta_3) + c\cos(\theta_2+\theta_3+\theta_4)\right],$$
$$j_{27} = c\sin(\theta+\theta_1)\cos(\theta_2+\theta_3+\theta_4),$$
$$j_{35} = -a_2\sin\theta_2 - a_3\sin(\theta_2+\theta_3) - c\sin(\theta_2+\theta_3+\theta_4),$$
$$j_{36} = -a_3\sin(\theta_2+\theta_3) - c\sin(\theta_2+\theta_3+\theta_4),$$
$$j_{37} = -c\sin(\theta_2+\theta_3+\theta_4),$$
$$b = \pm 1,$$
$$l = a_1 + a_2\sin\theta_2 + a_3\sin(\theta_2+\theta_3) + c\sin(\theta_2+\theta_3+\theta_4).$$

Построим функцию манипулятивности

$$w = \sqrt{\det\left(\mathbf{J}\mathbf{J}^T\right)} = \sqrt{f} = \sqrt{1/4\left(4a_3^2\left(2+h^2\right)+a_2^2\left(4\left(2+h^2\right)+a_3^2\left(4+h^2\right)\right)-\right.}$$
$$\sqrt{-4a_2^2\left(2+h^2\right)\cos 2\theta_2 - a_3\left(-4a_2\left(2+h^2\right)\cos\theta_3 + a_2^2 a_3\left(4+h^2\right)\cos 2\theta_3 + \right.} \qquad (3)$$
$$\left.\left.\sqrt{+4\left(2+h^2\right)\left(a_3\cos 2\left(\theta_2+\theta_3\right)+a_2\cos\left(2\theta_2+\theta_3\right)\right)-2a_2^2 a_3 h^2\cos 2\theta_1\sin^2\theta_3\right)}\right).$$

Как видно из (3), w зависит только от трёх обобщённых координат руки робота $\theta_1, \theta_2, \theta_3$.

Для нахождения конфигурации наибольшей манипулятивности найдём наибольшее значение знакопостоянной положительной [1] функции f в области (1). Из (3) следует, что f достигает максимума при $\theta_1 = 0$.

Примем согласно [5] следующие числовые значения параметров:

h=151 мм, d_1=147 мм, a_1=33 мм, a_2=155 мм, a_3=135 мм, a_4=81 мм, a_5=90 мм, a_6=47 мм. (4)

На рис. 2 представлен график функции $f\left(0, \theta_2, \theta_3\right)$ в области (1) .

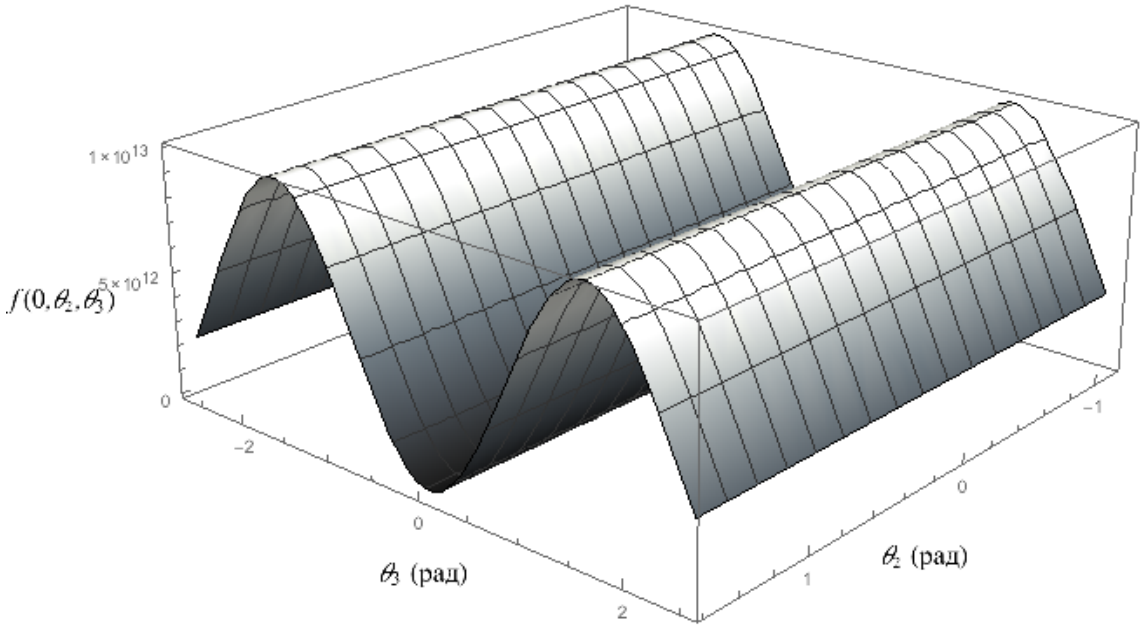


Рисунок 2 – График функции $f\left(0,\theta_2,\theta_3\right)$

Составим уравнения для нахождения стационарных точек функции $f\left(0,\theta_2,\theta_3\right)$

$$\begin{aligned}\frac{\partial f}{\partial \theta_2} &= 2\left(2+h^2\right)\left(a_2^2\sin 2\theta_2 + a_3\left(a_3\sin 2\left(\theta_2+\theta_3\right)+a_2\sin\left(2\theta_2+\theta_3\right)\right)\right)=0,\\ \frac{\partial f}{\partial \theta_3} &= a_3\left(2+h^2\right)\left(a_2^2 a_3\sin 2\theta_3 - a_2\sin\theta_3 + 2a_3\sin 2\left(\theta_2+\theta_3\right)+a_2\sin\left(2\theta_2+\theta_3\right)\right)=0.\end{aligned} \tag{5}$$

Каждое из уравнений (5) на координатной плоскости переменных θ_2,θ_3 определяет кривые, представленные на рис. 3.

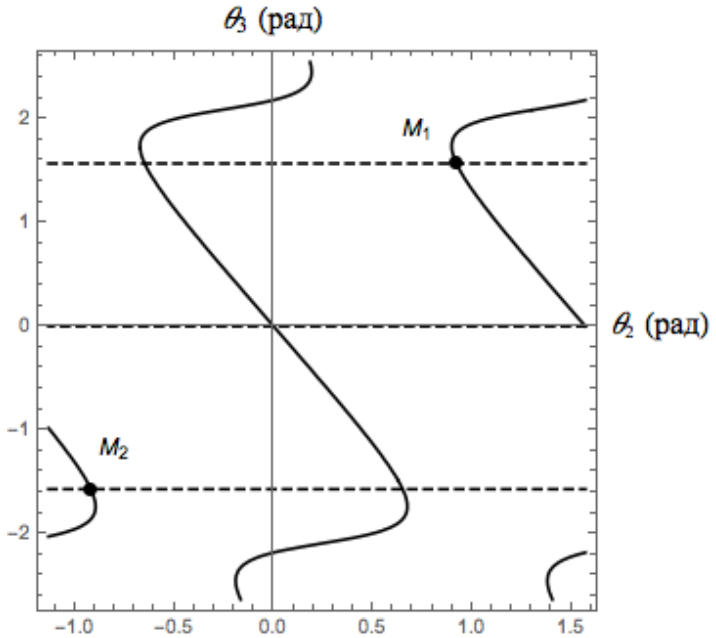


Рисунок 3 – Кривые, определяемые первым (сплошные линии) и вторым (пунктирные линии) уравнением (5)

Система уравнений (5) допускает точное аналитическое решение относительно θ_2, θ_3. Эти решения образуют множество *K* точек пересечения кривых на рис. 3:

$$K = \{(\theta_2, \theta_3\} : (0; 0), (\pi / 2; 0), (\pm 0,6502; \mp 1,5708), (\pm 0,9206, \pm 1,5707)\}.$$

Анализ производных второго порядка функции $f\left(0, \theta_2, \theta_3\right)$ показывает, что $\left(0;0\right)$ есть точка её локального минимума, а $M_1(0,9206,1,5707), M_2(-0,9206,-1,5707)$- точки локального максимума.

Исследование наибольших значений функции $f(0, \theta_2, \theta_3)$ на границах области (1) позволяет получить результаты в аналитическом виде, т.к. сводится к анализу свойств элементарных функций одной переменной. Из сравнения полученных наибольших значений $f(0, \theta_2, \theta_3)$ на границах области (1) и в точках локального максимума, следует, что $f(0, \theta_2, \theta_3)$ достигает максимального значения в области (1) в точках M_1, M_2. Функции $f(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ и $w(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ принимают наибольшие значения f_{max}, w_{max} в точках $P_1(0;0,9206;1,5707), P_2(0;-0,9206;-1,5707)$. Эти значения равны

$$f_{\max} = 9,98588 \cdot 10^{12}, w_{\max} = 3,16004 \cdot 10^6.$$

На рис.4, рис.5 представлен робот KUKA youBot в конфигурациях, соответствующих точкам P_1, P_2.

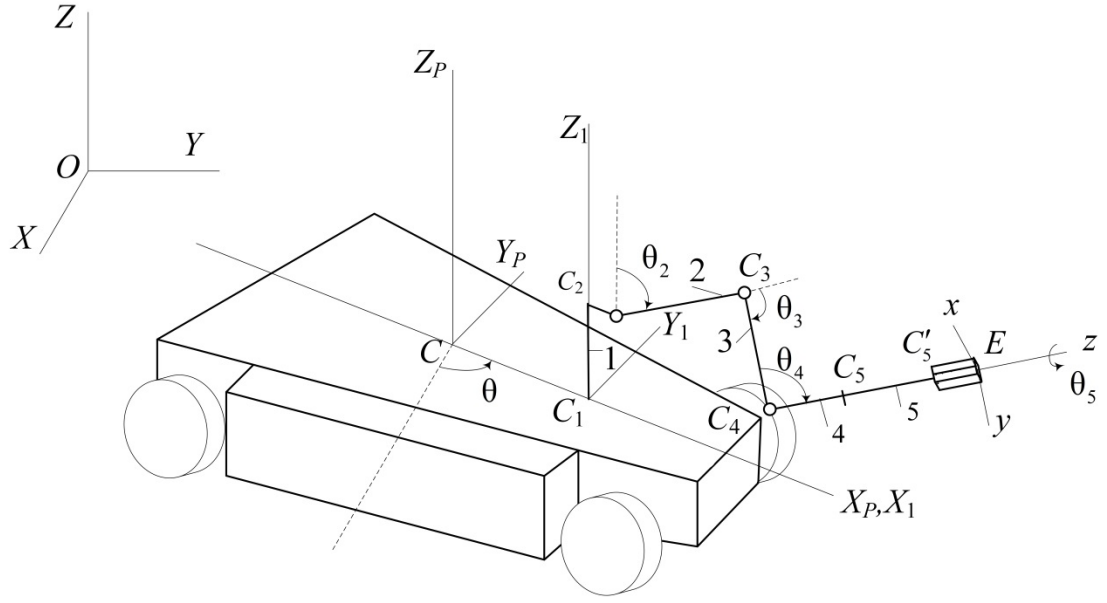


Рисунок 4 – KUKA youBot в конфигурации, соответствующей точке $P_1(0;0,9206;1,5707)$

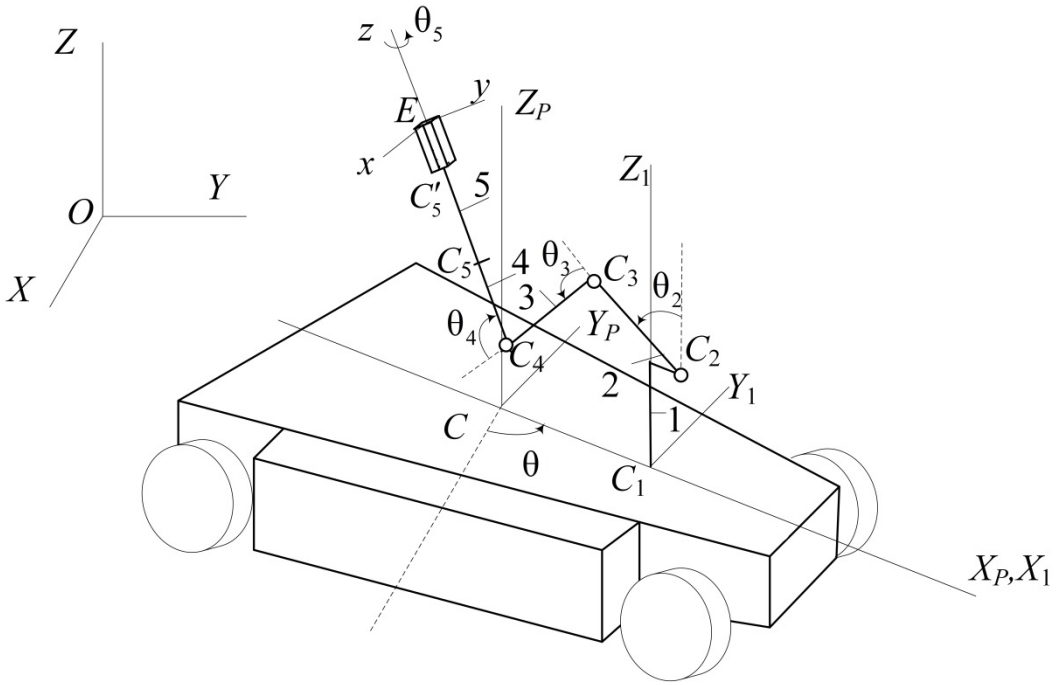


Рисунок 5 – KUKA youBot в конфигурации, соответствующей точке $P_2(0;-0,9206;-1,5707)$

Следует отметить, что конфигурация $\theta_2 = \theta_3 = 0$ является сингулярной, т.е. $W(\theta_1,0,0) = 0.$

Рассмотрим вопрос об управлении роботом с целью поддержания наибольшей манипулятивности при заданном законе движения рабочего органа.

KUKA youBot является кинематически избыточным механизмом. Для известного вектора $\mathbf{X}_d = \left(X_{Ed}, Y_{Ed}, Z_{Ed}, \psi_d, \theta_{Ed}, \varphi_d\right)^T$, определяющего программное положение рабочего органа относительно системы координат *OXYZ*, существует бесконечно много решений обратной задачи кинематики [6, 9]. Дополнительное условие обеспечения наибольшей манипулятивности позволяет выбрать одно из этих решений и принять его в качестве программного.

Обозначим

$$\theta_{1d} = 0, \theta_{2d} = \pm 0,9206, \theta_{3d} = \pm 1,5707 \tag{6}$$

числовые значения углов в конфигурации наибольшей манипулятивности. Из уравнений (2) после подстановки (6) найдём решение обратной задачи кинематики

$$\begin{aligned}
&X_{Cd} = X_{Ed} - \cos\theta_d \left[h + a_1 + a_2 \sin\theta_{2d} + a_3 \sin\left(\theta_{2d} + \theta_{3d}\right) \pm c \sin\theta_{Ed} \right], \\
&Y_{Cd} = Y_{Ed} - \sin\theta_d \left[h + a_1 + a_2 \sin\theta_{2d} + a_3 \sin\left(\theta_{2d} + \theta_{3d}\right) \pm c \sin\theta_{Ed} \right], \\
&\theta_d = \psi_d \mp \frac{\pi}{2}, \\
&\theta_{4d} = \theta_{Ed} \mp \left(\theta_{2d} + \theta_{3d}\right), \\
&\theta_{5d} = \varphi_d \mp \frac{\pi}{2}.
\end{aligned} \tag{7}$$

$X_{Cd}, Y_{Cd}, \theta_d, \theta_{4d}, \theta_{45}$ – программные значения координат $X, Y, \theta, \theta_4, \theta_5$ соответственно.

Следует заметить, что полученное в (7) значение θ_{4d} может не удовлетворять (1). В таком случае невозможно обеспечить выполнение условий (6) и следует решать задачу поиска наибольшего значения *w* по переменным $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ при одновременном выполнении ограничений (1).

Планирование движения робота, поддерживающего наибольшую манипулятивность, реализуется в соответствии со следующим алгоритмом:

1. Задать программное положение рабочего органа $\mathbf{X}_d = \left(X_{Ed}, Y_{Ed}, Z_{Ed}, \psi_d, \theta_{Ed}, \varphi_d\right)^T$.

2. Вычислить θ_{4d} по (7) и проверить выполнение (1) для θ_{4d}.

3. Если (1) выполнено относительно θ_{4d}, то найти по (6), (7) программные значения обобщённых координат робота $X_{Cd}, Y_{Cd}, \theta_d, \theta_{1d}, \theta_{2d}, \theta_{3d}, \theta_{5d}$.

4. Если (1) не выполнено относительно θ_{4d}, то найти $\theta_{1d}, \theta_{2d}, \theta_{3d}$ путем поиска наибольшего значения *w* с ограничениями (1).

5. Выполнить действия пунктов 1-4 для всех программных положений рабочего органа.

В качестве примера найдём программное движение робота, обеспечивающее сохранение конфигурации наибольшей манипулятивности (6), при условии, что точка *E* рабочего органа робота должна пройти через три точки расположенной в горизонтальной плоскости синусоиды $Y = 30\sin X$. Потребуем также, чтобы при этом рабочий орган двигался поступательно, ось *Ez* была бы направлена вертикально вниз, а углы ψ, φ сохраняли неизменные значения, равные $\pi/2$ и 0 соответственно. Выберем для определённости конфигурацию руки робота, соответствующую знакам плюс в (6).

В таком случае множество программных векторов $\mathbf{X}_d$ состоит из трёх элементов, которым соответствуют три вектора $\mathbf{Q}_d$ обобщённых координат робота, найденных по (6), (7). В табл.1 представлены координаты векторов $\mathbf{X}_d, \mathbf{Q}_d$(линейные размеры заданы в мм, углы - в радианах).

Из таб. 1 видно, что движение платформы, обеспечивающее сохранение наибольшей манипулятивности, представляет собой поступательное движение, в котором точка *C* платформы описывает синусоиду

$$Y_{Cd} = 30\sin\left(X_{Cd} - h - a_1 - a_2\sin\theta_{2d} - a_3\sin\left(\theta_{2d} + \theta_{3d}\right)\right).$$

в горизонтальной плоскости *OXY*.

Таблица 1. Программные векторы $\mathbf{X}_d, \mathbf{Q}_d$

$\mathbf{X}_d$						$\mathbf{Q}_d$							
X_{Ed}	Y_{Ed}	Z_{Ed}	ψ_d	θ_{Ed}	φ_d	X_{Cd}	Y_{Cd}	θ_d	θ_{1d}	θ_{2d}	θ_{3d}	θ_{4d}	θ_{5d}
0	0	-84,624	$\pi/2$	π	0	-389,103	0	0	0	0,9206	1,5707	0,65	$-\pi/2$
$\pi/6$	15	-84,624	$\pi/2$	π	0	-388,58	15	0	0	0,9206	1,5707	0,65	$-\pi/2$
$\pi/2$	30	-84,624	$\pi/2$	π	0	-387,532	30	0	0	0,9206	1,5707	0,65	$-\pi/2$

Полученные в работе аналитическое выражение манипулятивности (3) KUKA youBot и конфигурации (6) наибольшей манипулятивности, учитывающие мобильность платформы, позволили определить алгоритм построения программного движения робота, обеспечивающего сохранение высокой манипулятивности в процессе выполнения задания рабочим органом. Представленные результаты могут быть применены в образовании и исследованиях при решении различных теоретических и прикладных задач.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 16-01-00429 А.

1. Yoshikawa T. Manipulability of Robot Mechanisms // The International Journal Robotics Research, Vol. 4, 1985, pp. 3-9.
2. Yamamoto Y., Yun X. Coordinating locomotion and manipulation of a mobile manipulator // IEE Trans Automatic Control 1984; 6: 1326-1332.
3. Nagatani K., Hirayama T., Gofuku A., Tanaka Y. Motion planning for Mobile Manipulator with keeping Manipulability // IROS 2002, pp.1663-1668, Lausane, Switzerland, October 2002.
4. Bayle B., Fourquet J.Y., Renaud M. Manipulability of Wheeled Mobile Manipulators: Application to Motion Generation // Int. J. Robotics Research Vol.22 (7-8), pp. 565-581, 2003.
5. http://www.youbot-store.com/
6. Sharma S., Kraetzschmar G., Scheurer C. Unified Closed Form Inverse Kinematics for the KUKA youBot // Proceedings of ROBOTIK / 7-th German Conference on Robotics, 2012. P. 1-6.

7. Avanzini G. Buizza, Zanchettin A. M., Rocco P. Reactive Constrained Model Predictive Control for Redundant Mobile Manipulators // Proceedings of the 13th International Conference Intelligent Autonomous Systems, IAS-13 (Springer International Publishing 2016) pp. 1301–1314.
8. Patrinostro S., Tanzini M., Satler M., Ruffaldi E., Filippeschi A., Avizzano C. A. A haptic-assisted guidance system for working machines based on virtual force fields // Information Communication and Automation Technologies (ICAT) 2015 XXV International Conference on, pp. 1-6, 2015.
9. Капустина О.М. Аналитическое решение обратной задачи кинематики Kuka youBot, параметризованное обобщёнными координатами его платформы // В кн.: Экстремальная робототехника. Труды Международной научно-технической конференции. Санкт-Петербург: ИПЦ ООО «Политехника-принт», 2017. С. 47-52.

A.N. Mozhaev

SEGMENTATION OF POINT CLOUDS BY MEANS OF POINT CLOUD LIBRARY

Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics, Saint-Petersburg
a.mozhaev@rtc.ru

Abstract

This article is devoted to a survey of some functions of the open project Point Cloud Library, applied to solving problems of segmentation of point clouds. The algorithms of RANSAC and Region Growing are considered. Also a review of the function PassTrough, StatisticalOutlierRemoval, VoxelGrid and NormalEstimation.

Key words: Point Cloud Library, point cloud, segmentation algorithm, RANSAC, Region Growing

А.Н. Можаев

СЕГМЕНТАЦИЯ ОБЛАКОВ ТОЧЕК С ПОМОЩЬЮ СРЕДСТВ БИБЛИОТЕКИ POINT CLOUD LIBRARY

ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург
a.mozhaev@rtc.ru

Аннотация

Эта статья посвящена обзору некоторых функций открытого проекта Point Cloud Library, применительно к решению задач по сегментации облаков точек. Рассмотрены алгоритмы RANSAC и Region Growing. Также произведён обзор функций PassTrough, StatisticalOutlierRemoval, VoxelGrid и NormalEstimation.

Ключевые слова: Point Cloud Library, облако точек, алгоритм сегментации, RANSAC, Region Growing

Введение

Необходимость выделения объектов в массивах данных, полученных при помощи сенсоров, возникает в современной робототехнике достаточно часто. Это требуется для решения многих задач. Таких как: фильтрация и повышение качества полученных данных, построение карт местности, сбор сведений об окружающей обстановке. Выделение объектов среди большого количества данных вручную является трудоёмкой и утомительной задачей для человека, поэтому автоматизация этого процесса является перспективной задачей на сегодняшний день [1].

Достаточно часто данные для анализа поступают в виде облаков точек. Облако точек как правило представляет собой набор вершин в трёхмерной системе координат и предназначено для представления внешней поверхности объекта. Помимо пространственных координат каждой точке в облаке могут быть присвоены дополнительные параметры. Например, цвет, яркость или вектор нормали. Как правило облака точек получаются в результате лазерного сканирования, но встречаются и другие методы. [2].

Одним из современных и доступных средств обработки облаков точек является библиотека Point Cloud Library (PCL). Она представляет собой масштабный программный проект с открытым кодом, реализованный средствами C++. В рамках проекта разрабатываются современные алгоритмы обработки данных лазерного сканирования и других технологий получения трёхмерных облаков точек. Такие как: фильтрация, сегментация, выделение признаков, восстановление поверхности. Постоянными участниками проекта являются более 40 исследовательских групп и сотни индивидуальных участников. [3].

В рамках данной работы средства PCL использовались для сегментации облака точек, полученного методом многоракурсовой реконструкции данных стереокамеры, собранных наземным мобильным роботом внутри здания. К ним были применены методы фильтрации из библиотеки PCL:StatisticalOutlierRemoval и VoxelGrid. Выделение объектов производилось средствами PCL:SACSegmentation и RegionGrowing.

Цель и задачи работы

Целью работы являлось оценка возможности применения средств библиотеки PCL для сегментации исходного облака точек. Для оценки было решено сделать попытку сегментации при помощи алгоритмов библиотеки. Процесс сегментации был разделён на следующие задачи:

- разделение исходного облака на меньшие участки, удобные для обработки;
- применение к участкам статистического фильтра;
- вокселизация данных;
- проведение сегментации доступными в PCL алгоритмами.

Исходные данные

В качестве исходных данных использовалось облако, содержащее 2283205 точек, полученное методом многоракурсовой реконструкции данных стереокамеры, собранных наземным мобильным роботом внутри здания. Облако точек было представлено в формате .pcd и содержало в себе информацию о местоположении и цвете точек. Визуальное отображение этого облака можно увидеть на рисунке 1.

Разделение исходного облака точек

Для удобства работы, а также ввиду особенности работы одного из алгоритмов сегментации было решено разделить исходное облако точек на десять областей по 3 метра по осям OX и OY, и 2 метра по оси OZ.

Для операции разделения был применён фильтр PassThrough из библиотеки PCL суть которого заключается в удалении всех точек, лежащих за границами заданной области. На рисунке 3 будут показаны некоторые из них.

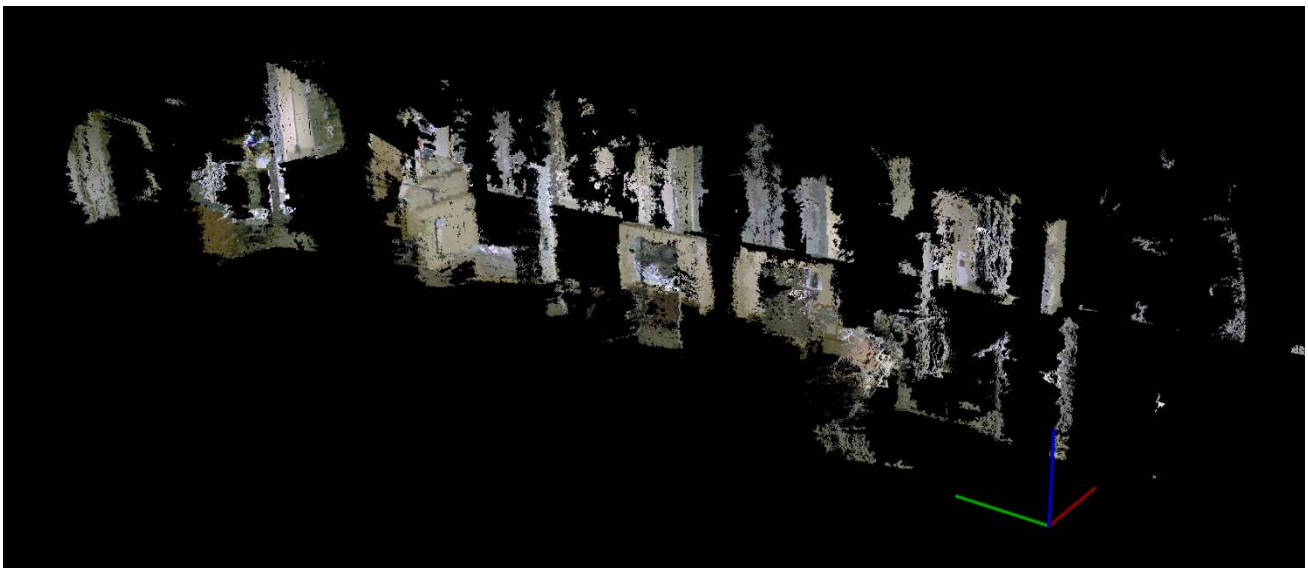


Рисунок 1 – Исходное облако точек

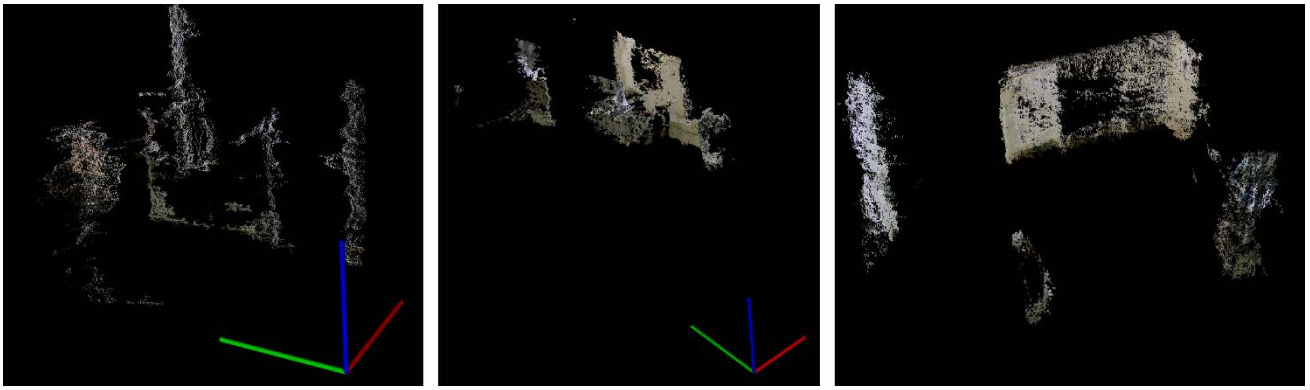


Рисунок 2 – Некоторые из областей, полученные в результате разделения

Применение статистического фильтра

Часто приходится работать с наборами данных с различно точечной плотностью. Кроме того, ошибки измерений приводят к появлению выбросов, которые еще больше ухудшают результаты. Это усложняет оценку характеристик локальных облаков точек, таких как определение нормалей к поверхности или изменения кривизны, что приводит к ошибочным значениям, что, в свою очередь, может привести к сбоям при регистрации облаков точек. Некоторые из таких нарушений могут быть решены путем проведения статистического анализа окрестности каждой точки и удаления тех, которые не соответствуют определенным критериям. Данный фильтр основан на вычислении распределения расстояний от каждой точки до её ближайших соседей во входном наборе данных. В каждой точке вычисляется среднее расстояние от неё до всех ближайших соседей. Предполагается, что в норме распределение является Гауссовским с некоторым средним и стандартным отклонением. Все точки, расстояния до которых находятся вне заданного интервала, рассматриваются как выбросы и удаляются из набора данных. Подобный фильтр реализован в PCL и называется StatisticalOutlierRemoval.

Алгоритм фильтра StatisticalOutlierRemoval в PCL осуществляет свой полный прогон за две итерации. При первой итерации алгоритм вычисляет среднее расстояние, которая каждая точка в наборе данных имеет до k ближайших соседей. Значение k задаётся при помощи функций setMeanK () и getMeanK (). Затем вычисляется среднее и стандартное отклонение всех этих расстояний, чтобы определить порог расстояния.

Порог расстояния определяется как:

$$Thresh = \mu + \alpha * \sigma\,, \tag{1}$$

где Thresh – порог расстояния; μ – среднее отклонение; α – множитель стандартного отклонения; σ – стандартное отклонение. Множитель стандартного отклонения α задаётся вручную при помощи функции setStddevMulThresh ().

Во время второй итерации точки классифицируются как качественные и выбросы если их среднее расстояние до k соседей меньше или больше порогового расстояния соответственно. [4].

Статистический фильтр был применён ко всем областям. Наилучшие результаты были получены при значениях k=50 и α=1. Результат применения фильтра можно увидеть на рисунке 3, где красными областями выделены участки откуда было удалено большинство точек. Количество точек в этой области снизилось с 113550 до 101978.

Рисунок 3 – Результат применения статистического фильтра к одной из областей

Вокселизация данных

После фильтрации количество точек в облаке уменьшается, но их всё еще остаётся довольно много. Для ускорения обработки такого облака часто применяют операцию уменьшения плотности облака или так называемая вокселизация. Как правило при этом происходят минимальные потери информации о сцене. Как правило для этого применяется воксельная сетка. Сцена разбивается на кубы (реже другие фигуры) заданного размера (воксели), из которых удаляются все точки, кроме ближайшей к центру вокселя.

Такой подход позволяет аппроксимировать информацию, содержащуюся в облаке. В результате число точек для дальнейшего анализа сокращается во много раз. Одна из функций в PCL, которая это реализует, находится в библиотеке pcl_filters и называется VoxelGrid.

Алгоритм работы данной функции достаточно прост для понимания. Функция создаёт воксельную сетку поверх исходного облака точек. Размеры вокселя задаются при помощи функции setLeafSize (). После этого точки внутри каждого вокселя аппроксимируются в одну точку. Стоит обратить внимание на то, что данная функция предоставляет выбор, куда будут аппроксимированы точки внутри вокселя. В данной работе в качестве этого критерия был выбран центр тяжести всех точек внутри вокселя. Такой алгоритм работает дольше по сравнению с аппроксимацией точек в геометрический центр вокселя, но при этом он более точно отражает особенности первоначального облака точек. [5].

Результат работы данного фильтра с размерами вокселей 5 $см^3$ применительно к одной из областей показан на рисунке 4. Количество точек в облаке снизилось с 101978 до 2445 точек. В результате количество точек уменьшилось в 40 раз.

Сегментация методом RANSAC

Следующим этапом было непосредственное проведение сегментации внутри областей средствами PCL. Одним из методов, представленных в библиотеке является RANSAC (RANdom SAmple Consensus) или «метод случайных выборок». Принцип работы данного алгоритма заключается в итеративной выборке минимального подмножества элементов, необходимого для вычисления параметров модели, оценке данных параметров с помощью некоторого критерия и по завершению всех итераций – выборе наилучшего набора параметров и соответствующего им подмножества. Данный метод снискал большую популярность благодаря сочетанию простоты и эффективности, позволяющему даже при большом количестве выбросов давать приемлемые результаты. [6, 7]

Рисунок 4 – Результат вокселизации данных

В PCL существует несколько возможностей применения данного метода, одной из которых является выделение наибольшей плоскости в облаке точек. Именно эта вариация метода был выбран в данной работе. Было решено попытаться выделить стены в исходном облаке точек путём задания дополнительных ограничений и выделения вертикальных плоскостей.

У этого метода имеется существенный недостаток, заключающейся в том, что он способен найти только одну плоскость за одно своё применение. Причём в неё попадут все точки, лежащие в наибольшей плоскости, а не только принадлежащие стенам. В результате в большом облаке может быть выделена плоскость проходящая через всё облако и совершенно не отражающее расположение реальных стен в помещении. Именно для компенсации этого недостатка было принято решение разбить исходное облако на меньшие области.

Однако даже в небольшом облаке могло оказаться несколько вертикальных плоскостей. Для того чтобы выделить их всех было применено следующее решение. В области методом RANSAC

выделялась наибольшая вертикальная плоскость шириной 2 см, после чего все точки, принадлежащие этой плоскости, удалялись и процесс повторялся, пока от исходного облака не оставалось менее 25% точек.

Полученные результаты снова были подвергнуты статистической фильтрации для удаления отдельных, случайно попавших в вертикальные плоскости точек. После этого обработанные области были вновь объединены. Результат можно увидеть на рисунке 5.

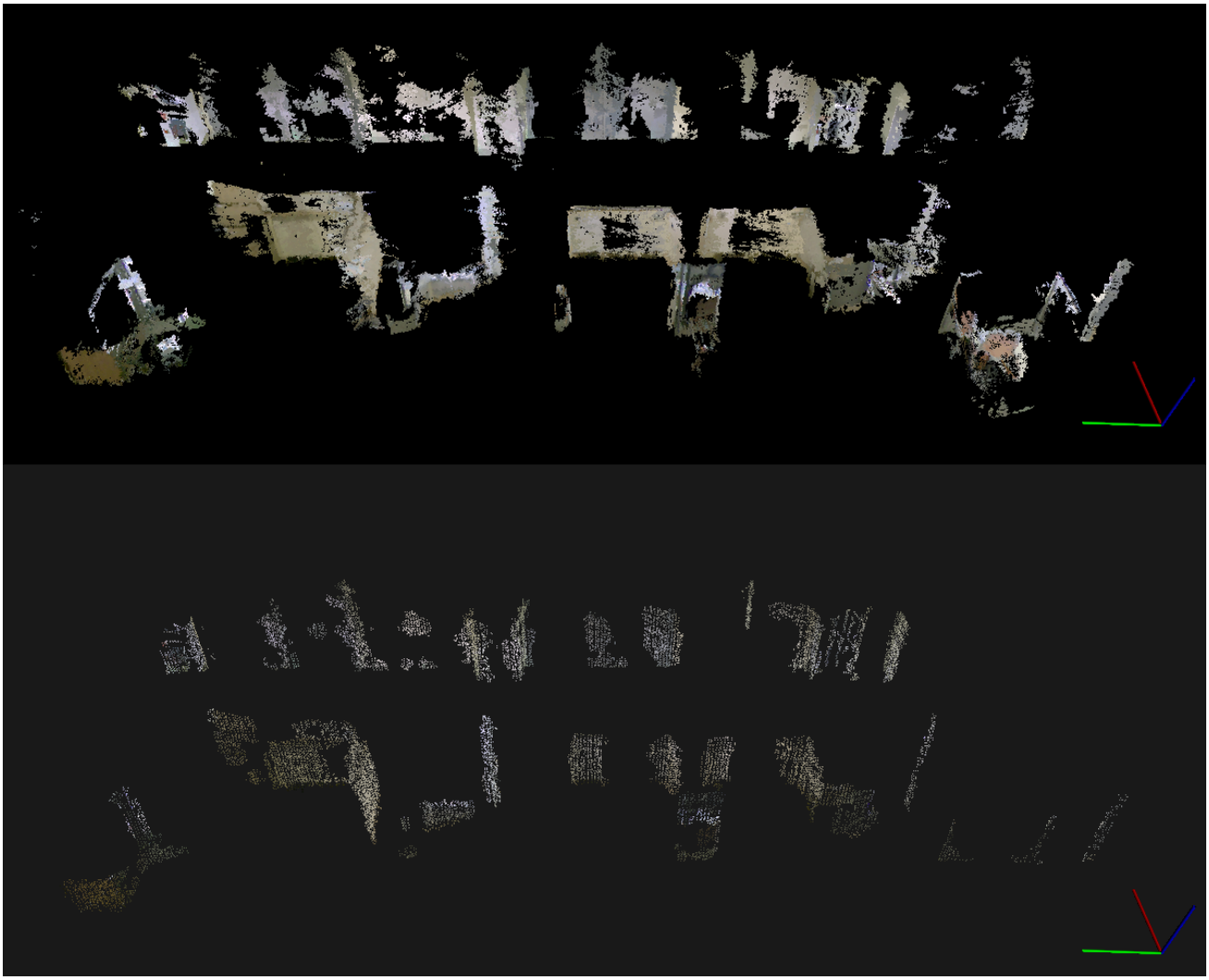


Рисунок 5 – Результат работы алгоритма RANSAC

В результате были выделены точки, относящиеся к вертикальным плоскостям. Однако, это необязательно точи относящиеся непосредственно к стенам помещения.

Сегментация методом Region Growing

Ещё одним методом сегментации доступным в PCL является Region Growing. Данный алгоритм основан на поиске «опорных точек» (seed points) и создании кластеров вокруг них из прилегающих точек по определённым признакам. Признаком, используемым в работе, являлась кривизна поверхности в точках. Для определения кривизны поверхности в облаке сперва необходимо было определить нормали точек к поверхности, что доступно в библиотеке PCL при помощи функции Normal Estimation.

Направление нормалей к поверхности является важной геометрической особенностью для точки. Это свойство геометрической поверхности используется во многих областях, таких как восстановление поверхности.

Нормаль для точки являющийся частью геометрической поверхности принято определять, как вектор направленный из этой точки перпендикулярно к этой поверхности. Так как облако точек

представляет собой набор точечных образцов на реальной поверхности, то существует два принципиальных метода определения направления нормалей к поверхности для облаков точек:

– Получение подстилающей поверхности из облака точек, используя методы поверхностной сетки, а затем вычислить нормали к поверхности из этой сетки;

– Использование приближений для вывода нормалей к поверхности непосредственно из облака точек.

Функция PCL NormalEstimation использует второй метод.

Задача определения нормали к точке на поверхности аппроксимируется задачей оценки нормали касательной к поверхности плоскости, которая, в свою очередь, становится задачей оценки подгонки плоскости наименьшего квадрата в k-окрестности точки P^k. Плоскость представляется в виде точки x и нормального вектора $\vec{n}$, а расстояние от точки $p_i \in P^k$ к плоскости определяется как $d_i = (p_i - x) * \vec{n}$. Далее значения x и $\vec{n}$ вычисляются методом наименьших квадратов так чтобы $d_i = 0$. Принимая $\bar{x} = \bar{p} = \frac{1}{k} * \sum_{i=1}^{k} p_i$ в качестве центройда P^k, решение для $\vec{n}$ задаётся путём анализа собственных значений и собственных векторов ковариационной матрицы $C \in R^{3x3}$ из P^k, выраженное как:

$$C = \frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k} \xi_i * (p_i - \bar{p}) * (p_i - \bar{p})^T, C * \vec{v_j} = \lambda_j * \vec{v_j}, j \in \{0, 1, 2\} \quad (2, 3)$$

Коэффициент ξi является возможным весом для p_i и обычно равен 1. C симметрична и положительно полуопределённая, а её собственные значения являются вещественными числами $\lambda_j \in R$. Собственные векторы $\vec{v_j}$ формируют ортогональную структуру, соответствующую основным компонентам P^k. Если $0 \leq \lambda_0 \leq \lambda_1 \leq \lambda_2$, то собственный вектор $\vec{v_j}$ соответствует наименьшему собственному значению λ_0, является таким образом приближением $+\vec{n}$ = {nx, ny, nz} или $-\vec{n}$.

Основными параметрами ввода для функции NormalEstimation являются количество точек рассматриваемых в качестве соседей, которое задаётся через setKSearch () или радиус сферы окрестности, который задаётся через setRadiusSearch (). [8].

Результаты применения алгоритма Region Growing можно увидеть на рисунке 6.

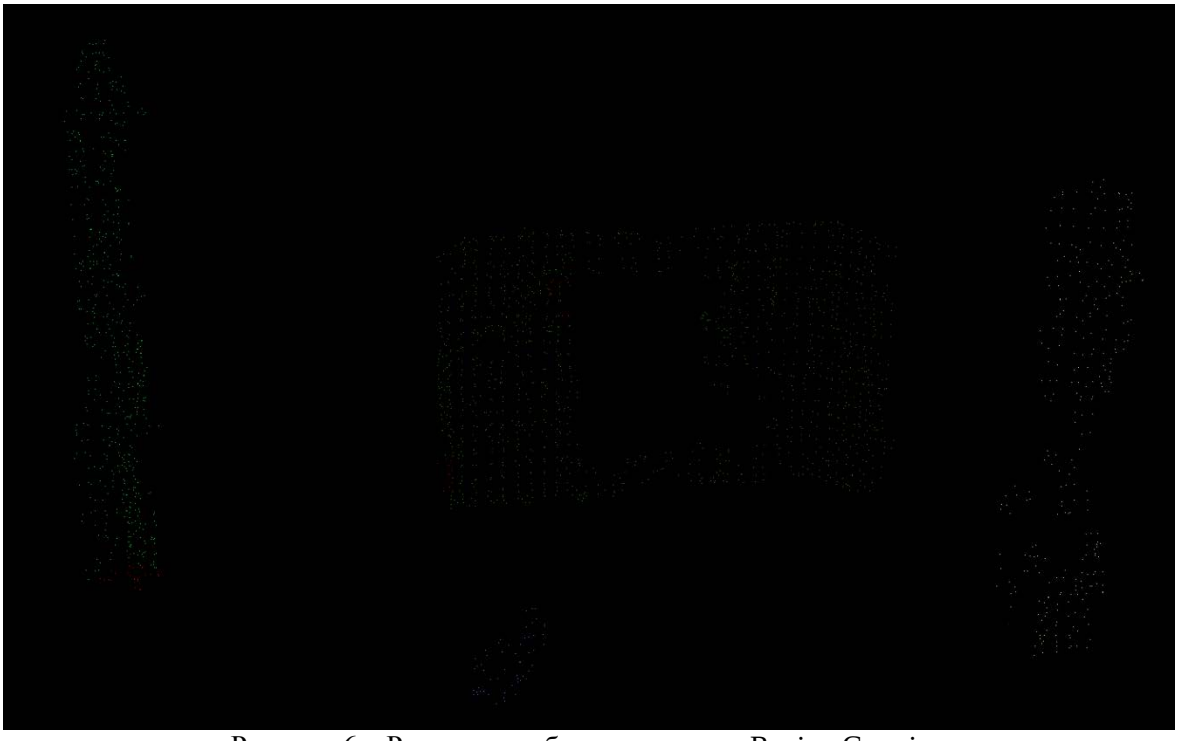


Рисунок 6 – Результат работы алгоритма Region Growing

Как видно область была разделена на четыре больших кластера, которые находятся отдельно друг от друга. Однако пока они не могут быть однозначно идентифицированы.

Заключение

В работе были рассмотрены различные функции библиотеки Point Cloud Library и применены к облаку точек с целью проведения его сегментации. Сегментация была проведена с помощью

алгоритмов RANSAC и Region Growing. Помимо этого, использовались такие функции библиотеки как: фильтры PassThrough и StatisticalOutlierRemoval, VoxelGrid, NormalEstimation. Также использовались функции чтения, записи и объединения облаков точек.

Можно сказать, что данный программный пакет можно применять для решения большого спектра задач при работе с облаками точек. К плюсам PCL можно отнести его доступность, простоту освоения, активную поддержку сообщества и разработчиков, наличие большого количества встроенных алгоритмов и функций. К минусам можно отнести невозможность влиять на некоторые параметры работы алгоритмов напрямую без углублённого изучения данной библиотеки.

1. Ni Huan, Lin Xiangguo, Zhang Jixian. Classification of ALS Point Cloud with Improved Point Cloud Segmentation and Random Forests. Remote Sensing 2017, 9(3), 288, MDPI, Switzerland.
2. Vo Anh-Vu, Truong-Hong Linh, Laefer Debra F, Bertolotto Michela. Octree-based region growing for point cloud segmentation. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 2015, Volume 104, p. 88-100.
3. What is PCL? [электронный ресурс] // URL: http://https.www.pointclouds.org/about/ (Дата обращения 15.01.2018)
4. Описание алгоритма статистического фильтра выбросов [электронный ресурс] // URL: http://www.willowgarage.com/sites/default/files/Rusu08RAS-Semantic.pdf (Дата обращения 15.01.2018)
5. Описание фильтра построения воксельной сетки [электронный ресурс] // pcl. URL: http://pointclouds.org/documentation/tutorials/voxel_grid.php (Дата обращения 15.01.2018)
6. D. Nister. Preemptive RANSAC for Live Structure and Motion Estimation, IEEE International Conference on Computer Vision, pp. 199-206, 2003.
7. Алсынбаев, К.С. Алгоритмы определения тел объёмных объектов в трёхмерном нерегулярном облаке точек // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. 2015, №10. С. 159-165.
8. Описание алгоритма определения нормалей к поверхности [электронный ресурс] // URL: https://pdfs.semanticscholar.org/58af/b412e41cfe2d77cdd89aa65e8f821bdd36d7.pdf (Дата обращения 15.01.2018)

L.Yu. Vorochaeva, A.V. Malchikov, A.A. Postol'niy

APPROACHES TO DESIGNING WHEELED JUMPING ROBOT

Southwest State University, Kursk
mila180888@yandex.ru, zveroknnp@gmail.com, a.postolniy@mail.ru

Abstract

The paper describes a technique for calculating the prototype of a wheeled jumping robot designed for monitoring the environment and moving across rough terrain. The robot uses two principles of movement: wheeled when moving over fairly flat surfaces and jumping to overcome obstacles. An example of designing such a robot using the proposed calculation technique is shown, a three-dimensional model of the device is constructed.

Key words: wheeled jumping robot, acceleration module, transformable wheel platform, calculation technique, approaches to design.

Л.Ю. Ворочаева, А.В. Мальчиков, А.А. Постольный

ПОДХОДЫ К ПРОЕКТИРОВАНИЮ КОЛЕСНОГО ПРЫГАЮЩЕГО РОБОТА

Юго-Западный государственный университет, г. Курск
mila180888@yandex.ru, zveroknnp@gmail.com, a.postolniy@mail.ru

Аннотация

В работе описана методика расчета прототипа колесного прыгающего робота, предназначенного для мониторинга окружающей среды и перемещающегося по пересеченной местности. Робот

использует два принципа движения: колесный при перемещении по достаточно ровным поверхностям и прыжковый для преодоления препятствий. Показан пример проектирования такого робота с использованием предложенной методики расчета, построена трехмерная модель устройства.

Ключевые слова: колесный прыгающий робот, разгонный модуль, трансформируемая колесная платформа, методика расчета, подходы к конструированию.

Введение

В настоящее время роботы для мониторинга состояния окружающей среды часто проектируются как комбинированные системы, использующие несколько принципов движения (колесно-прыгающие, прыгающе-летающие, колесно-летающие и т.д.) [1-10]. Это позволяет расширить сферы применения роботов, повысить их среднюю скорость, маневренность и проходимость по местности с препятствиями. К одним из наиболее перспективных направлений в этой области можно отнести колесных прыгающих роботов [4-10], которые в общем случае состоят из корпуса, колесной платформы и разгонного модуля. Такие роботы имеют два режима перемещения: качение на колесах и прыжки. Первый из них используется для движения по достаточно ровной местности и для позиционирования роботов в нужном направлении перед прыжком, а второй – для преодоления препятствий. Стоит отметить, что в таких роботах для их разгона и отрыва от поверхности как правило используется поступательная пара (пневматический привод, пружина растяжения/сжатия), а способы их позиционирования перед прыжком разнообразны. Так в [4, 5] рассмотрен четырехколесный робот, который для прыжка под требуемым углом к горизонту поворачивает разгонный модуль внутри корпуса (рисунок 1, а). Описанный в [6, 7] робот при позиционировании при помощи дополнительных опорных элементов поворачивает корпус вместе с разгонным модулем относительно поверхности, отрывая при это от нее одно из колес (рисунок 1, б). Работа [9] посвящена двухколесному прыгающему роботу, у которого корпус жестко связан с колесами, а внутри корпуса без возможности поворота относительно него расположен разгонный модуль, установка робота перед прыжком происходит за счет поворота корпуса на колесах (рисунок 1, в). Аналогичный способ позиционирования рассмотрен в статье [10], отличие заключается в том, что колесная платформа трехколесная, два колеса являются ведущими, а третье служит дополнительной опорой. Для размещения устройства под заданным углом к горизонту происходит отрыв третьего колеса от поверхности и поворот всего робота на двух ведущих колесах без использования дополнительных опор за счет расположения в них центра масс системы (рисунок 1, г).

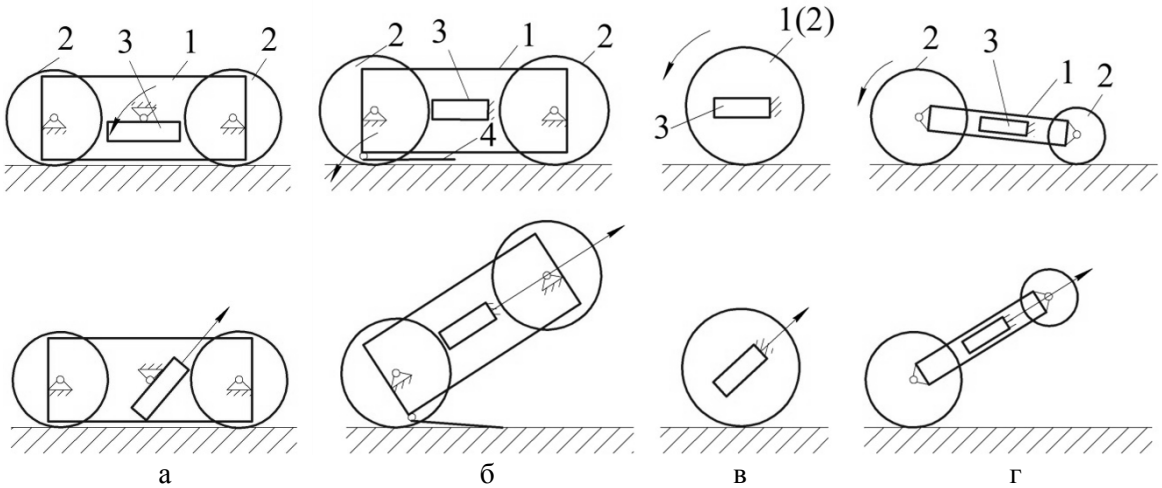


Рисунок 1 – Способы позиционирования колесных прыгающих роботов: 1 – корпус, 2 – колеса, 3 – разгонный модуль, 4 – опорный элемент

В данной работе предложена оригинальная конструкция колесной платформы прыгающего робота, которая в отличие от рассмотренных выше является трансформируемой при помощи специального рычага. Работа посвящена вопросам проектирования и конструирования такого прыгающего робота, описана последовательность необходимых расчетов. Такой выбор постановки задачи обусловлен тем, что в большинстве работ по прыгающим роботам рассматриваются их математические модели, методики прыжка, алгоритмы моделирования, принципы работы систем

управления и приводится анализ результатов моделирования, но опущены вопросы, связанные с проектированием прототипов данных роботов, проведением расчетов и выбором приводов и механических передач.

Конструктивная схема и принцип движения

Рассматриваемый в работе колесный прыгающий робот предназначен для передвижения по пересеченной местности с различными препятствиями в целях мониторинга окружающей среды. В качестве колесной платформы данный робот использует трансформируемую, имеющую две конфигурации, одна из которых позволяет роботу перемещаться на колесах по неровной и пересеченной местности, а другая используется для осуществления прыжка. Конструктивная схема робота приведена на рисунке 2.

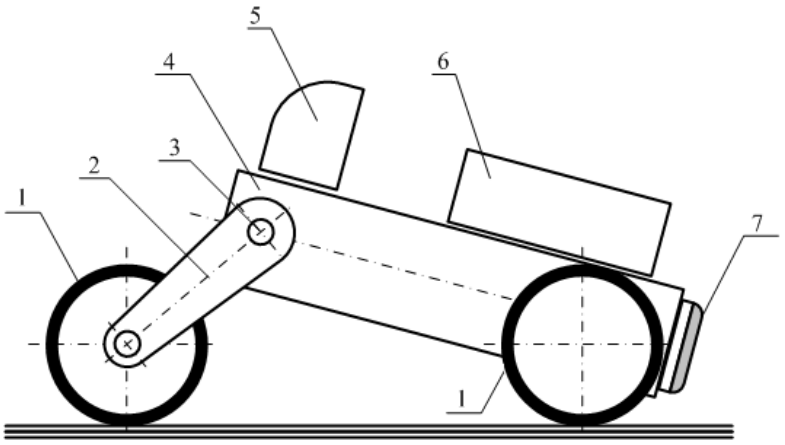
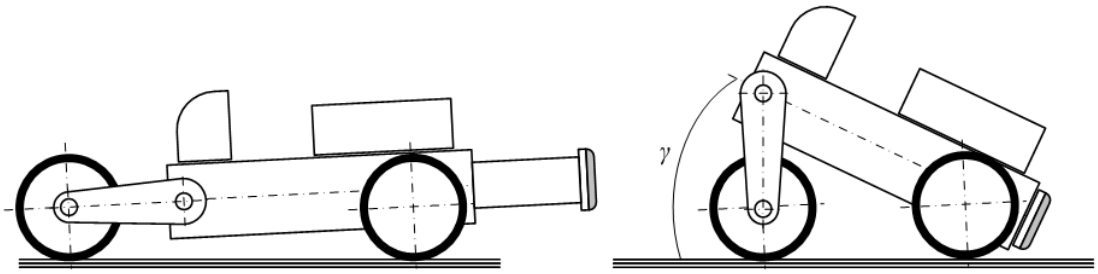


Рисунок 2 – Схема колесного прыгающего робота

На данном рисунке показаны следующие основные элементы конструкции: 1 – упругие мотор-колеса, обеспечивающие хорошее сцепление устройства с поверхностью, а также гашение ударных нагрузок в процессе приземления робота после прыжка; 2 – поворотный рычаг привода передних колес робота; 3 – привод, обеспечивающий поворот рычага и задание требуемого угла при прыжке; 4 – корпус робота, на котором монтируются составные части конструкции; 5 – система датчиков и видеонаблюдения робота; 6 – блок электроники и аккумуляторных батарей; 7 – разгонный модуль, обеспечивающий отрыв устройства от поверхности.

Робот движется следующим образом. При перемещении по пересеченной местности как колесной платформы устройство находится в положении, показанном на рисунке 3, а. Для преодоления препятствия робот занимает положение, представленное на рисунке 3, б, характеризующееся взведенным поршнем механизма прыжка и положением рычага переднего колесного привода, обеспечивающим требуемый угол γ ориентации относительно поверхности.



а б

Рисунок 3 – Конфигурации колесного прыгающего робота:
а – при качении на колесах и при приземлении; б – перед прыжком

Рассмотрим более подробно устройство разгонного модуля робота. Существуют различные подходы к организации отрыва от поверхности мобильных роботов, наиболее распространенными решениями являются использование пневматических [4, 6] и электромеханических [8-10] приводов. Применение пневматических приводов ограничивает количество прыжков размерами баллона со

сжатым воздухом. К тому же актуальна проблема возвращения поршня пневмосистемы в исходное положение. В электромеханических приводах прыжка не решенной до конца остается проблема кинематической связи штока механизма прыжка и механических частей передачи, а наличие ударов и высокие нагрузки приводят к быстрому износу и выходу из строя элементов конструктивной схемы. В настоящей работе предлагается использование электромеханического привода прыжка, схема которого показана на рисунке 4.

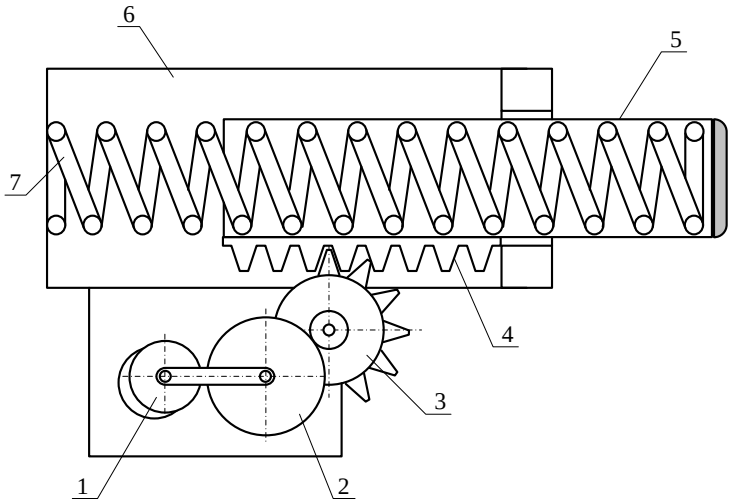


Рисунок 4 – Схема разгонного модуля

Разгонный модуль состоит из следующих компонентов: 1 – мотор-редуктор, 2 – ведущая шестерня разгонного модуля, 3 – секторная шестерня, обеспечивающая кинематическую развязку редуктора электропривода в начальной фазе прыжка, когда ударные нагрузки наиболее велики, 4 – фрагмент реечной передачи, зубчатое зацепление, осуществляющее взведение пружины разгонного модуля, 5 – стакан-толкатель, 6 – корпус электромеханической системы прыжка, 7 – пружина.

Принцип работы разгонного модуля заключается в следующем. Для взведения пружины и перевода ее в сжатое состояние вал двигателя вместе ведущей шестерней вращаются по часовой стрелке, ведущая шестерня за счет зацепления с секторной шестерней заставляет последнюю вращаться против часовой стрелки, приводя в движение рейку реечной передачи, жестко соединенную со стаканом, в котором располагается пружина. При перемещении рейки влево пружина сжимается. Во время разгона происходит отключение питания на мотор-редукторе, за счет чего пружина разжимается, происходит удар разгонного модуля о поверхность и прыжок робота.

Основные подходы к проектированию

Для проектирования прототипа описанного колесного прыгающего робота необходимо разработать методику расчета его основных узлов, заключающуюся в выполнении определенной последовательности расчетов на основании исходных для расчетов данных. В качестве таких данных будем рассматривать массу робота m, его габаритные размеры: длину, ширину и высоту $lxbxh$, а также высоту вертикального прыжка h.

Последовательность расчетов можно представить следующим образом (таблица 1).

Таблица 1. Последовательность расчетов колесного прыгающего робота

№	Наименование расчета	Результаты расчета
1	Энергетический расчет	Жесткость пружины и создаваемая ею сила при наибольшей деформации
2	Расчет пружины	Геометрические параметры пружины, создаваемые ею усилия
3	Расчет привода взведения разгонного модуля	Мощность двигателя, передаточное отношение редуктора
4	Расчет реечной передачи	Геометрические параметры рейки и зубчатого колеса
5	Расчет привода колесной платформы	Мощность двигателя
6	Расчет привода поворота рычага	Мощность двигателя

Рассмотрим данную методику расчета более подробно.

Энергетический расчет. Вначале необходимо рассчитать требуемое усилие на исполнительном звене разгонного модуля. Для этого кинетическая энергия робота в момент отрыва от поверхности приравнивается к потенциальной энергии в наивысшей точке прыжка

$$mgh = \frac{m\upsilon^2}{2}, \tag{1}$$

где g – ускорение свободного падения, υ – начальная скорость прыжка.

Тогда начальная скорость поршня равна

$$\upsilon = \sqrt{2gh}\,. \tag{2}$$

Определим жесткость c пружины, требуемую для развития устройством скорости υ. Для этого запишем равенство потенциальной и кинетической энергий следующим образом:

$$\frac{cx^2}{2} = \frac{m\upsilon^2}{2}, \tag{3}$$

где x – рабочий ход пружины, откуда

$$c = \frac{m\upsilon^2}{x^2}. \tag{4}$$

При этом усилие при максимальной деформации пружины составит

$$F_{\max} = cx. \tag{5}$$

Расчет пружины. Следующим этапом проектирования является расчет пружины сжатия. Исходными данными для него выступают [11]: $P_{\max}$ – сила пружины при максимальной деформации; c – жесткость пружины; x – рабочий ход (определяется требованиями к габаритным размерам робота); v – наибольшая скорость перемещения подвижного конца пружины; N – число циклов до разрушения. В результате расчетов будут определены следующие параметры пружины: диаметр проволоки d, наружный диаметр пружины D, средний диаметр пружины D_0, число рабочих n и полных n_0 витков, длина пружины в свободном состоянии L_0 и при рабочей деформации L_2, масса пружины m_p, шаг пружины t.

Расчет привода взведения разгонного модуля. Данный расчет включает в себя определение мощности двигателя, а также при необходимости вычисление передаточного отношения редуктора с последующим выбором этих компонентов. Для этого необходимо задать значение скорости υ^* взведения пружины. Исходя из особенностей использования робота, нет необходимости в высоком быстродействии механизма взведения пружины, поэтому скорость поступательного движения поршня при взведении пружины может быть определена по соотношению $\upsilon^* = \upsilon/(100..150)$. Тогда мощность привода будет определяется как

$$P_{\text{пр}} = F_{\max}\upsilon^* k_{\text{зап}}, \tag{6}$$

где $k_{\text{зап}}$ – коэффициент запаса.

Мощность двигателя при этом можно вычислить по формуле

$$P_{\text{дв}} = \frac{P_{\text{пр}}}{\eta_{\text{р}}}\xi_{\text{р}}, \tag{7}$$

где $\eta_{\text{р}}$, $\xi_{\text{р}}$ – КПД и коэффициент запаса механической передачи.

Положим, что момент, развиваемый двигателем, равен T_{dv}, а момент, который должен обеспечиваться этим двигателем на шестерне реечной передачи, равен T_r, причем $T_r > T_{dv}$. Тогда для обеспечения требуемого момента T_r может потребоваться дополнительная ступень редуктора с передаточным отношением

$$u = \frac{T_r}{T_{dv}\eta_r}, \tag{8}$$

где η_r – КПД редуктора.

Расчет реечной передачи. Следующим шагом проектирования является расчет зубчатого зацепления реечной передачи. Для его проведения необходимо задать следующие параметры [12]: момент T_r на шестерне реечной передачи, скорость υ^* рейки относительно вала шестерни, коэффициент ширины зубчатого венца шестерни, а также параметры материала, из которого будет изготовлена реечная передача. В результате расчетов будут определены: делительный диаметр шестерни d_k, модуль зубчатого зацепления m_m, число зубьев шестерни z_k, ширина зубчатого венца шестерни b_k, ширина зубьев рейки b_r.

Расчет привода колесной платформы. После этого переходим к расчету электроприводов колесной платформы. В качестве исходных данных используются: масса робота m, масса m_k и радиус r_k колеса, максимальная линейная скорость V движения робота на колесах. Для нахождения необходимого тягового момента воспользуемся уравнением Лагранжа второго рода [13], в котором в качестве обобщенной координаты используется угол φ_k поворота колеса

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \omega_k}\right) - \frac{\partial T}{\partial \varphi_k} = Q, \tag{9}$$

где T – кинетическая энергия робота, Q – обобщенная сила, ω_k – угловая скорость колеса.

Кинетическая энергия робота равна

$$T = T_{korp} + 4T_k, \tag{10}$$

где

$$T_{korp} = m_{korp}V^2/2 \tag{11}$$

– кинетическая энергия корпуса,

$$T_k = m_k V^2/2 + J_k\omega_k^2/2 \tag{12}$$

– кинетическая энергия колеса, J_k – момент инерции колеса.

Обобщенная сила равна

$$Q = M_{dv} - F_a r_k - M_{fr}, \tag{13}$$

где

$$F_a = CS\rho V^2/2 \tag{14}$$

– аэродинамическая сила сопротивления, C – коэффициент аэродинамического сопротивления, S – площадь лобовой части робота в проекции на плоскость, перпендикулярную направлению движения, ρ – плотность воздуха,

$$M_{fr} = \delta N/4 \tag{15}$$

– момент трения качения, δ – коэффициент трения качения, $N = mg$ – нормальная реакция.

Тогда момент двигателя M_{dv} определяется из формулы (13) с учетом (10) - (15).

Выходная мощность двигателя:

$$P_{dv} = \omega_k M_{dv}\xi/\eta, \tag{16}$$

где ξ – коэффициент запаса, η – КПД механической передачи.

Расчет привода поворота рычага. Теперь перейдем к расчету привода, обеспечивающего изменение конфигурации робота для осуществления прыжка под требуемым углом к горизонту. Его момент вычисляется по формуле [13]

$$M_{pov} = J\ddot{\gamma} + M_{тяж} + M_{сопр}, \tag{17}$$

где $J = m_1 l^2$ – момент инерции; $\ddot{\gamma}$ – угловое ускорение поворота передней части робота (определяется, исходя из требуемого времени поворота разгонного модуля); $M_{тяж}$ – момент силы тяжести; $M_{сопр}$ – момент сопротивления, m_1 – масса передней оси робота; l – длина рычага.

Мощность данного двигателя определяется следующим образом:

$$P_{pov} = \dot{\gamma} M_{pov} \xi / \eta . \quad (18)$$

Выполнение расчетов по описанной методике позволит определить параметры и осуществить выбор основных элементов колесного прыгающего робота.

Трехмерная модель колесного прыгающего робота

Рассмотрим результаты расчетов робота с массой $m = 1$ кг и габаритными размерами 0.2x0.2x0.1 м, осуществляющего вертикальный прыжок на высоту $h = 2.5$ м. Для реализации прыжка робот должен использовать пружину с жесткостью $c = 4905$ Н/м с максимальным усилием при деформации $F_{\max} = 491$ Н. Диаметр проволоки пружины равен $d = 2.8$ мм, наружный диаметр $D = 24$ мм, длина пружины в свободном состоянии $L_0 = 160$ мм, число рабочих витков $n = 12.5$. Для взведения разгонного модуля такого робота требуется привод с мощностью $P_{\text{дв}} = 10$ Вт, в качестве которого выбран мотор-редуктор Pololu 37D, для развития требуемого крутящего момента необходим редуктор с передаточным отношением $u = 40$. В результате расчетов реечной передачи были получены ее основные геометрические параметры: делительный диаметр шестерни $d_k = 23.5$ мм, модуль зубчатого зацепления $m_m = 1.5$ мм, число зубьев шестерни $z_k = 17$, ширина зубчатого венца шестерни $b_k = 17$ мм, ширина зубьев рейки $b_r = 15$ мм. В качестве двигателя каждого колеса платформы необходимо использовать двигатель с мощностью $P_{dv} = 3.5$ Вт, был выбран мотор-редуктор Wls_Mot. Мощность двигателя, осуществляющего поворот рычага, должна быть $P_{pov} = 0.15$ Вт, тогда можно использовать сервопривод DF05BB Standard Servo.

Трехмерная модель исследуемого робота, построенная в соответствии с результатами расчетов, представлена на рисунке 5.

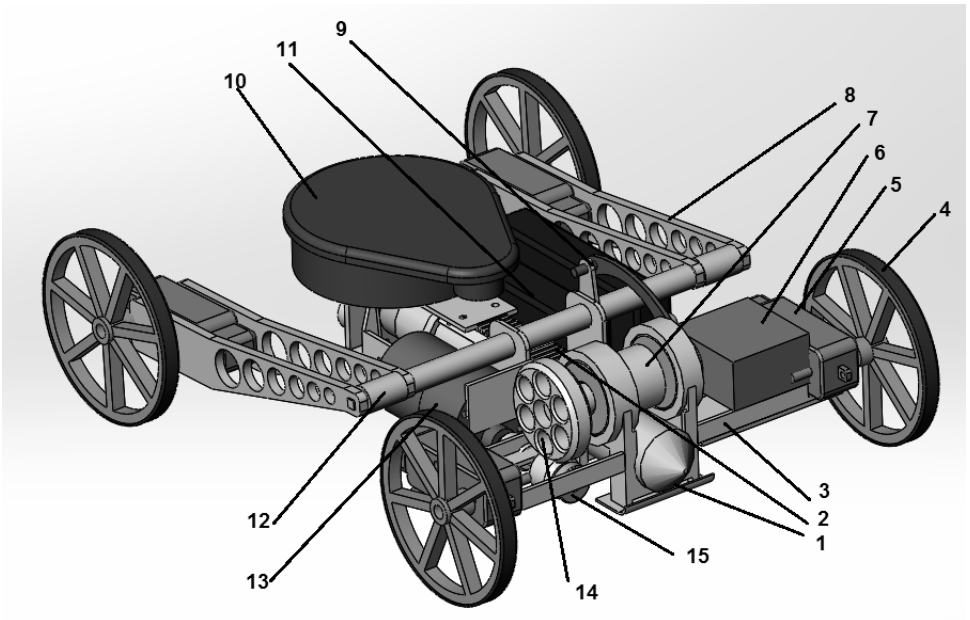


Рисунок 5 – Трехмерная модель прыгающего колесного робота

На рисунке 5 приняты следующие обозначения: 1 – поршень разгонного модуля, 2 – зубчатое зацепление, 3 – силовая рама робота, 4 – колесо, 5 – мотор-редуктор колесного движителя, 6 – сервопривод поворота рычага робота, 7 – секторная шестерня механизма взведения пружины, 8 – рычаг передней оси колесного привода, 9 – шатун механизма поворота передней оси, 10 – лидар, 11 – аккумуляторные батареи, 12 – упругий вал поворотной оси, 13 – мотор-редуктор взвода пружины, 14 – червячное колесо, 15 – червяк.

Конструкция разгонного модуля более детально показана на рисунке 6.

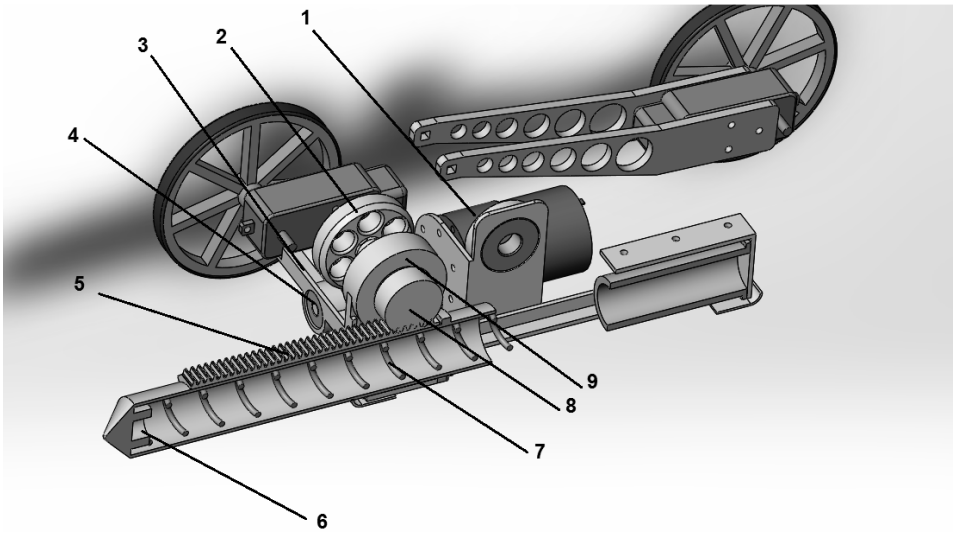


Рисунок 6 – Конструкция разгонного модуля

На рисунке 6 используются следующие обозначения: 1 – мотор-редуктор, 2 – червячное колесо, 3 – рама, 4 – подшипник червячного вала, 5 – фрагмент реечной передачи, 6 – стакан разгонного модуля, 7 – пружина, 8 – секторная шестерня, 9 – подшипник механической передачи.

Важным элементом конструкции является силовая алюминиевая рама, которая представляет собой достаточно сложную пространственную сварную конструкцию (рисунок 7).

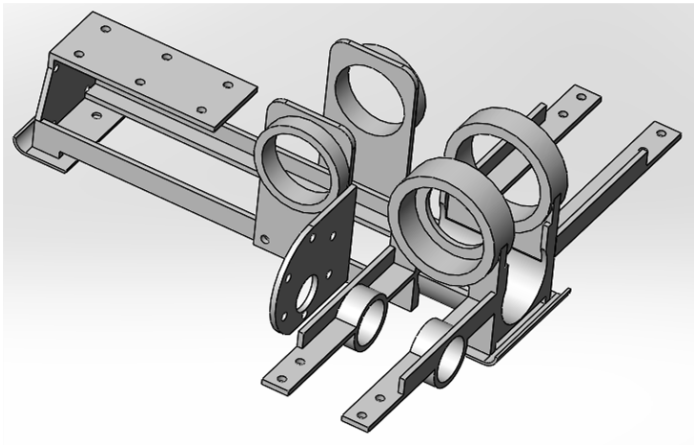


Рисунок 7 – Силовая рама

На рисунке 8 показаны различные конфигурации робота, реализуемые спроектированным прототипом.

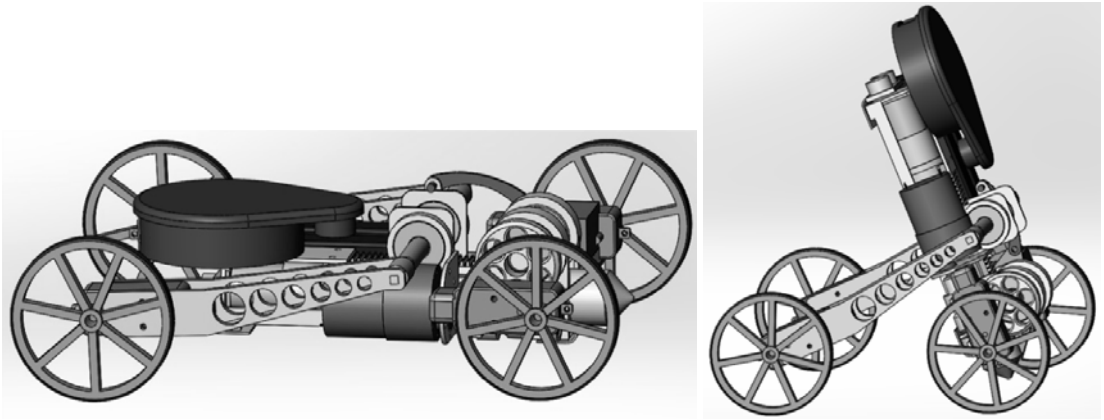


Рисунок 8 – Конфигурации прототипа колесного прыгающего робота: а – в качестве колесной платформы, б – конфигурация перед прыжком

Заключение

В работе рассмотрены основные подходы к проектированию прототипа колесного прыгающего робота с трансформируемой колесной платформой, приведена последовательность расчетов, базирующаяся на исходных данных, которыми являются масса робота, его габаритные размеры и требуемая высота вертикального прыжка. В результате выполнения расчетов по изложенной в статье методике могут быть определены мощности приводов и передаточные отношения редукторов, что позволит осуществить выбор этих компонентов, а также параметры пружины сжатия и реечной передачи, используемых в разгонном модуле.

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ № 18-31-00075.

1. Kalantari A., Spenko M. Modeling and Performance Assessment of the HyTAQ, a Hybrid Terrestrial/Aerial Quadrotor // IEEE Transactions on Robotics. Vol. 30. № 5. P. 1278 - 1285.
2. Kovač M., Hraiz W, Fauria O., Zufferey J.-C., Floreano D. The EPFL jumpglider: A hybrid jumping and gliding robot with rigid or folding wings //Proc. IEEE Intern. Conf. Robotics and Biomimetics (ROBIO). Karon Beach, Phuket, Thailand. 2011.
3. Woodward M. A., Sitti M. MultiMo-Bat: A biologically inspired integrated jumping–gliding robot // Intern. J. of Robotics Research. 2014. Vol. 33. № 12. P. 1511-1529.
4. Salton J. R. Urban Hopper // SPIE Defense, Security and Sensing. Orlando, Florida, USA. 2010.
5. Яцун С.Ф., Волкова Л.Ю., Ворочаев А.В. Исследование режимов разгона четырехзвенного прыгающего аппарата // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2013. № 24 (127). С. 86-92.
6. Ackerman E. Boston dynamics sand flea robot demonstrates astonishing jumping skills // Proc. of the IEEE Spectrum. 2012.
7. Ворочаева Л.Ю., Яцун С.Ф. Математическое моделирование управляемого движения колесного пятизвенного прыгающего робота // Известия РАН. ТиСУ. 2015. № 3. С. 81–106.
8. Stoeter S., Papanikolopoulos N. Kinematic Motion Model for Jumping Scout Robots // Proc. of the IEEE Transactions on Robotics and Automation. Orlando. 2006. Vol. 22. № 2. P. 397-402.
9. Tsukagoshi H., Sasaki M., Kitagawa A., Tanaka T. Design of a higher jumping rescue robot with the optimized pneumatic drive // Proc. of the IEEE Intern. Conference. on Robotics and Automation. Barcelona, Spain. 2005. P. 1276–1283.
10. Schmidt-Wetwkam C., Bewley T. An arm suspension mechanism for an underactuated single legged hopping robot // Proc. of the ICRA. Shanghai, China. 2011. P. 5529-5534.
11. Анурьев В. И. Справочник конструктора-машиностроителя: в 3 т.; под ред. И. Н. Жестковой. М.: Машиностроение, 2003. 3 т.
12. Красковский Е.Я., Дружинин Ю.А., Филатова Е.М. Расчет и конструирование механизмов приборов и вычислительных систем; под ред. Ю.А. Дружинина. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1991 480 с.
13. Добронравов В.В., Никитин Н.Н. Курс теоретической механики. М.: Высш. шк., 1983. 575 с.

A.A. Vlasenko, A.L. Korotkov

THE MANIPULATOR DESIGN PRINCIPLES BASED ON MULTI TURN JOINTS FOR A SMALL ROBOTIC PLATFORM WITH QUICK EQUIPMENT REPLACEMENT

Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics, Saint-Petersburg
a.vlasenko@rtc.ru, a.korotkov@rtc.ru

Abstract

An analytical review and comparison of existing manipulators for mobile robotic systems weighing from 5 to 15 kg was carried out. The principles and methods of constructing such manipulators are considered. The general principles of construction and drawbacks of such manipulators are revealed. Based on the formulated requirements, the manipulator configuration is determined. Force calculation of the developed manipulator with the use of approximate masses of the links is made, the necessary torques in the manipulator joints are determined. The possibility of replacing attachments without external intervention is considered, with the exception of the robot operator, using a "basket" mounted on a robotic platform and intended for storing replacement tools. For the robotics platform, the requirements for the manipulator installation are formulated.

Key words: robotic arm, electric motor, degree of freedom, mechanical transmission, kinematic pair, manipulator link, torque.

А.А. Власенко, А.Л. Коротков

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ МАНИПУЛЯТОРА НА ОСНОВЕ ПОЛНООБОРОТНЫХ ШАРНИРОВ ДЛЯ МАЛОГАБАРИТНОЙ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ ПЛАТФОРМЫ, С ВОЗМОЖНОСТЬЮ ОПЕРАТИВНОЙ ЗАМЕНЫ НАВЕСНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург
a.vlasenko@rtc.ru, a.korotkov@rtc.ru

Аннотация

В работе проведен аналитический обзор и сравнение существующих манипуляторов для мобильных РТК массой от 5 до 15 кг. Рассматриваются принципы и методы построения таких манипуляторов. Выявлены общие закономерности построения и недостатки таких манипуляторов. На основе сформулированных требований определена конфигурация манипулятора. Проведен силовой расчет разрабатываемого манипулятора с использованием ориентировочных масс звеньев, определены необходимые вращательные моменты в шарнирах манипулятора. Рассмотрена возможность замены навесного оборудования без внешнего вмешательства, за исключением действия оператора робота, с использованием «корзины», устанавливаемой на робототехнической платформе и предназначенной для хранения сменных инструментов. Для робототехнической платформы сформулированы требования для установки манипулятора.

Ключевые слова: манипулятор для робототехнической платформы, электропривод, степень подвижности, механическая передача, кинематическая пара, звено манипулятора, вращательный момент.

Введение

Мобильные робототехнические комплексы широко используются для разведки и получения информации о труднодоступных или опасных для жизни и здоровья человека местах (разрушенное здание, зона катастрофы, зона военных действий). Для расширения функциональных возможностей мобильных робототехнических платформ на них устанавливаются манипуляторы, что позволяет проводить не только визуальную инспекцию, но и совершать различные технологические операции над объектами. Существующие манипуляторы для мобильных робототехнических платформ массой от 5 до 15 кг имеют ограниченные функциональные возможности, заключающиеся, как правило,

в перемещении объектов за счет двухпальцевого схвата, который опционально может оснащаться камерой видеонаблюдения.

Использование инструмента на схвате манипулятора позволяет совершать более сложные технологические операции. Возможность оперативной замены навесного оборудования существенно сокращает время выполнения задания и позволяет сэкономить заряд аккумуляторных батарей, необходимый для движения к месту смены оборудования и обратно. Пыле- и влагозащищенная конструкция с использованием полнооборотных шарниров обеспечивает устойчивость манипулятора к воздействиям внешней среды и рабочую зону большего объема.

Современные разработки манипуляторов для мобильных робототехнических платформ

1. Манипулятор Servosila Robotic Arm.

Манипулятор Servosila Robotic Arm (см. рис. 1) – это съемный модуль для робототехнических платформ. Он обладает водозащитой и пылезащищенностью, вследствие чего может использоваться в дождливую и снежную погоду. Манипулятор Servosila Robotic Arm способен противостоять ударам и столкновениям с препятствиями.

Манипулятор имеет 5 степеней подвижности и способен поднять объект массой до 6 кг на границе рабочей зоны, при массе в 8 кг. В шарнирах находятся приводы с волновым редуктором и встроенным подшипниковым узлом.

Модульная конструкция, состоящая из приводов и соединяющих их звеньев, позволяет варьировать конфигурацию манипулятора. Отдельные модули могут заменяться для изменения параметров манипулятора, например, для расширения или уменьшения радиуса рабочей зоны.

В качестве сменного оборудования на схват манипулятора опционально может устанавливаться модуль технического зрения, включающий в себя различные камеры [1].

Рисунок 2 – Манипулятор Servosila Robotic Arm, Servosila, Россия

2. Манипулятор DM4-A2.

Манипулятор DM4-A2 (см. рис. 2) – это модульный манипулятор для робототехнических платформ, который состоит из звеньев, обеспечивающих 4 степени подвижности, и оснащен двухпальцевым схватом. Изготавливается манипулятор по стандартам фирмы-производителя Resquared Robotics. Управление осуществляется с помощью копирующего манипулятора (джойстика).

Манипулятор имеет 4 степени подвижности и способен поднимать объект массой до 4,5 кг вблизи робота, при массе манипулятора в 2 кг. В шарнирах располагаются приводы с планетарными редукторами, передающие вращательный момент к звеньям через подшипниковые узлы.

Рисунок 3 – Манипулятор DM4-A2 Resquared Robotics, США

Опционально может устанавливаться дополнительная камера на звено перед схватом для визуального контроля захвата объекта [2].

3. Манипулятор робота SUGV.

Манипулятор разработан для использования на мобильной платформе SUGV для захвата и перемещения объектов, открывания дверей.

Манипулятор имеет 4 степени подвижности и способен поднимать объект массой 5,4 кг на границе рабочей зоны, при массе в 3,7 кг.

Манипулятор оснащен только вращательными шарнирами, приводимыми в движение электродвигателями через червячную передачу. Вращение схвата вокруг продольной оси осуществляется через цилиндрическую зубчатую передачу [3].

Рисунок 4 – Манипулятор робота SUGV Endeavor Robotics, США

4. Манипулятор Jaguar Robotic Arm.

Манипулятор разработан для использования на мобильной платформе Dr. Robot Jaguar 4 x 4 Mobile Platform и на платформе Jaguar V2.

Манипулятор имеет 4 степени подвижности и способен поднимать объект массой до 4 кг на границе рабочей зоны, при массе манипулятора в 9,5 кг.

Шарниры манипулятора приводятся в движение электродвигателями с планетарными редукторами [4].

Рисунок 5 – Манипулятор Jaguar Robotic Arm DrRobot, Канада

Принципы построения манипуляторов

Рассмотренные манипуляторы оснащены только вращательными кинематическими парами, в следствие чего все они имеют сферическую рабочую зону, ограниченную снизу конструктивной геометрией мобильной платформы и расположением манипулятора. В шарнирах используются, в основном, планетарные и червячные редукторы, т.к. они обеспечивают требуемую точность позиционирования и необходимое передаточное число при меньшей экономической стоимости и сложности изготовления по сравнению с волновыми редукторами. На манипуляторы установлены двухпальцевые схваты с возможностью опциональной установки дополнительных камер, которые могут служить для наблюдения за захватом объекта, для наблюдения из-за препятствий, для стереозрения или тепловизионного обследования. Рассмотренные манипуляторы состоят из корневого звена, двух или трех промежуточных звеньев и схвата, все звенья соединены вращательными кинематическими парами, однако у части манипуляторов отсутствует степень подвижности в корневом звене.

К недостаткам рассмотренных манипуляторов можно отнести следующие:

- внешняя прокладка проводов;
- неполнооборотные шарниры;
- ограниченный набор дополнительного сменного оборудования;
- использование механических передач с низким КПД (червячная передача).

Формирование требований к предлагаемому манипулятору

На основе обзора и анализа рассмотренных манипуляторов сформулированы следующие требования к манипулятору:

- использование вращательных кинематических пар;
- использование механической передачи с высоким КПД;
- возможность оперативной смены навесного оборудования;
- грузоподъемность 3 кг на границе рабочей зоны;
- длина до 900 мм;
- масса манипулятора до 3 кг.

Возможность смены оборудования без возвращения робота к месту обслуживания, существенно сокращает время выполнения миссии, расширяет функциональные возможности мобильной робототехнической платформы и позволяет сэкономить заряд аккумуляторных батарей робота, необходимый для движения к месту обслуживания и обратно. Проведенный анализ манипуляторов для мобильных платформ массой от 5 до 15 кг позволяет сделать вывод о том, что разработка

манипулятора с возможностью оперативной смены навесного оборудования является актуальной и перспективной задачей.

Расчет

Для расчета используется схема манипулятора с пятью степенями подвижности, что обеспечивает подвижность рабочего органа манипулятора и позволяет совершать сложные движения. Для анализа вращательных моментов проведен статический силовой расчет и симуляция движения манипулятора в программном пакете SolidWorks Motion.

Для расчета и моделирования движения, использовалось значение массы манипулятора, равное 2,7 кг, при условии подъема груза массой $m_г$ = 3 кг. В моделировании манипулятор из сложенного состояния раскладывается в полностью вытянутое и осуществляет подъем объекта массой 3 кг. В качестве поднимаемого объекта к схвату манипулятора прикладывается сила, которая начинает действовать при достижении манипулятором требуемого положения и линейно увеличивается с 0 до 30 Н за 1 с.

При этом в расчете и моделировании использовалось следующее распределение масс по звеньям:

– масса первого звена, m_2 = 1000 г;

– масса второго звена, m_3 = 800 г;

– масса третьего звена вместе со схватом, m_4 = 550 г;

– длина первого звена, l_2 = 375 мм;

– длина второго звена, l_3 = 325 мм;

– длина третьего звена вместе со схватом, l_4 = 160 мм.

Силовой статический расчет проводился для положения манипулятора, показанного на рис. 5, т.к. это наиболее нагруженное положение, в соответствии со следующей формулой:

$$M_r = m \cdot g \cdot \cos(q),$$

где M_r – момент реакции в шарнире, m – масса звена, g – ускорение свободного падения, q – угол подъема звена. Поскольку масса звена и ускорение свободного падения постоянные величины, то момент реакции изменяется в зависимости от угла подъема звена, значение $\cos(q)$ будет максимальным при угле подъема 0°.

Вращательные моменты в шарнирах (см. рис. 6) рассчитывались согласно следующему уравнению:

$$M_{i-1,i} = m_i \cdot g \cdot \frac{l_i}{2} + R_{i,i+1} \cdot l_i + M_{i+1,i}$$

где $M_{i-1,i}$ – искомый вращательный момент в шарнире i-го звена, m_i – масса i-го звена, g – ускорение свободного падения, l_i – длина i-го звена, $R_{i,i+1}$ – сила реакции между i-ым и $(i+1)$-ым звеном, $M_{i+1,i}$ – вращательный момент в шарнире $(i+1)$-го звена [5].

$$M_{3,4} = m_4 \cdot g \cdot \frac{l_4}{2} + m_г \cdot g \cdot l_4 =$$
$$= 0{,}55\ [\text{кг}] \cdot 9{,}8 \left[\frac{\text{м}}{\text{с}^2}\right] \cdot \frac{0{,}16\ [\text{м}]}{2} + 3\ [\text{кг}] \cdot 9{,}8 \left[\frac{\text{м}}{\text{с}^2}\right] \cdot 0{,}16\ [\text{м}] = 4{,}4\ [\text{Н} \cdot \text{м}];$$

$$R_{3,4} = R_{4,3} = m_4 \cdot g + m_г \cdot g =$$
$$= 0{,}55\ [\text{кг}] \cdot 9{,}8 \left[\frac{\text{м}}{\text{с}^2}\right] + 3\ [\text{кг}] \cdot 9{,}8 \left[\frac{\text{м}}{\text{с}^2}\right] = 34{,}8\ [\text{Н}];$$

$$M_{2,3} = m_3 \cdot g \cdot \frac{l_3}{2} + R_{3,4} \cdot l_3 + M_{4,3} =$$
$$= 0{,}8[\text{ кг}] \cdot 9{,}8 \left[\frac{\text{м}}{\text{с}^2}\right] \cdot \frac{0{,}325[\text{м}]}{2} + 34{,}8[\text{Н}] \cdot 0{,}325[\text{ м}] + 4{,}44[\text{Н} \cdot \text{м}] = 17[\text{Н} \cdot \text{м}];$$

$$R_{2,3} = R_{3,2} = m_3 \cdot g + R_{3,4} = 0{,}8[\text{кг}] \cdot 9{,}8 \left[\frac{\text{м}}{\text{с}^2}\right] + 34{,}8[\text{Н}] = 42{,}6[\text{Н}];$$

$$M_{1,2} = m_2 \cdot g \cdot \frac{l_2}{2} + R_{2,3} \cdot l_2 + M_{3,2} =$$
$$= 1[\text{кг}] \cdot 9{,}8 \left[\frac{\text{м}}{\text{с}^2}\right] \cdot \frac{0{,}375[\text{м}]}{2} + 42{,}6[\text{Н}] \cdot 0{,}375[\text{м}] + 17[\text{Н} \cdot \text{м}] = 34{,}8[\text{Н} \cdot \text{м}].$$

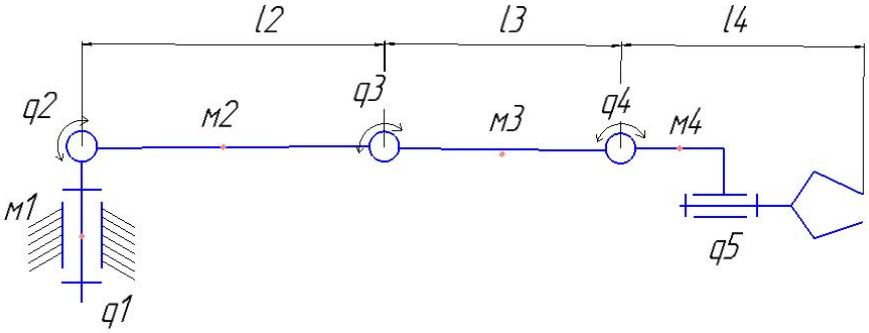


Рисунок 6 – Расчетная схема манипулятора

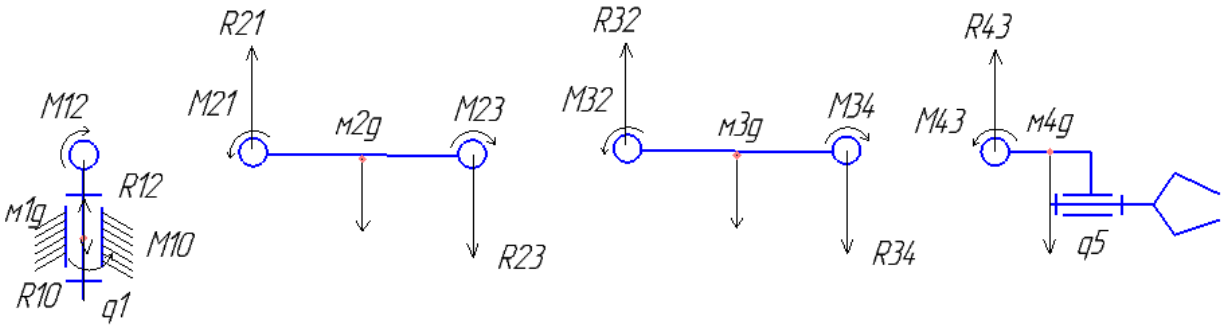


Рисунок 7 – Расчетная схема звеньев манипулятора

По результатам статического расчета (см. рис. 7) для подъема объекта массой 3 кг на границе рабочей зоны необходимо 34,8 Н·м в шарнире q_2; 17 Н·м в шарнире q_3; 4,4 Н·м в шарнире q_4.

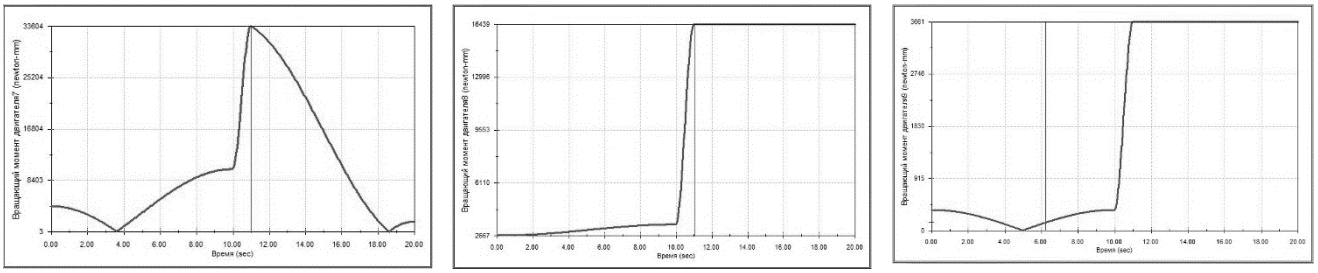


Рисунок 7 – Эпюра момента в шарнирах q_2 (слева), q_3 (в центре) и q_4 (справа)

По результатам исследования в Solidworks Motion для подъема 3 кг на границе рабочей зоны в шарнире q_2 (см. ранее рис. 5) необходим вращательный момент 33,6 Н·м, в шарнире q_3 необходим вращательный момент 16,4 Н·м, в шарнире q_4 необходим вращательный момент 3,6 Н·м.

Расхождение в результатах расчетов возможно из-за разных методов решения.

Определение конфигурации манипулятора

По результатам расчета и на основе аналитического обзора используется схема манипулятора с пятью степенями подвижности и вращательными кинематическими парами, что обеспечивает подвижность схвата манипулятора и сферическую рабочую зону.

В шарнирах манипулятора возможно использование цилиндрического, планетарного, червячного или волнового редуктора. Для сравнения редукторов в табл. 1 показаны КПД, обратимость и возможность проведения кабелей через редуктор.

Таблица 1. Сравнение типов редукторов

Тип редуктора	**КПД**	**Обратимость**	**Возможность прокладки проводов**
Цилиндрический	До 90% на 1 ступень	+	–
Планетарный	До 95% на 1 ступень	+	+
Волновой	До 95%	–	+
Червячный	До 30%	–	+

На основании вышеизложенного в шарнирах решено использовать многоступенчатые планетарные редукторы, т.к. они способны обеспечить большое передаточное число при использовании многоступенчатой схемы и высокий КПД. Проведение проводов через данный тип редуктора возможно при использовании полых валов солнечного колеса и водила совместно с электродвигателем MaxonMotor серии EC Frameless Flat, в котором статор и ротор имеют сквозное отверстие. Данные электродвигатели представляют из себя разделенные статор и ротор (см. рис. 8), без подшипников и вала двигателя.

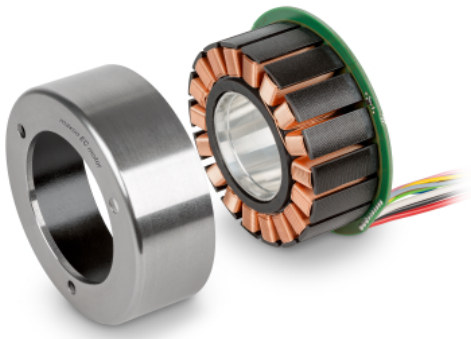


Рисунок 8 – Электродвигатель серии EC Frameless Flat

На рис. 9 представлена кинематическая схема предлагаемого редуктора с двумя ступенями [6]. В шарнирах манипулятора количество ступеней может варьироваться для получения требуемого передаточного числа, вращательного момента и скорости вращения. Валы I, II, III – полые, электродвигатель (поз. 1) – MaxonMotor серии EC Frameless Flat со сквозными отверстиями в статоре и роторе.

Поворотное основание манипулятора располагается внутри мобильной платформы, что позволяет сделать манипулятор компактнее. Для обеспечения компактности и использования минимального объема внутри робототехнической платформы в корневом шарнире выбрана червячная передача.

На рис. 10 представлена кинематическая схема поворотного основания с червячным редуктором [6]. Использование червячной передачи позволяет сделать основание плоским и пропустить провода через полый выходной вал (поз. III).

Для расширения функциональных возможностей в манипуляторную систему входит «корзина» – хранилище для сменных инструментов. Корзина располагается на робототехнической платформе в рабочей зоне манипулятора и представляет из себя блок, в котором в закрепленном состоянии располагаются сменные модули инструментов. Модуль освобождается из хранилища при необходимости использования, непосредственно перед его захватом. Для более надежного удержания сменные модули оборудованы специальным переходником для стыковки с губками схвата. Передача электропитания осуществляется через губки схвата, оборудованные специальными разъемами, и стыковочный переходник, оборудованный ответными разъемами к губкам схвата. Наблюдение за

действием сменного модуля осуществляется с камеры, установленной в модуле на схвате манипулятора.

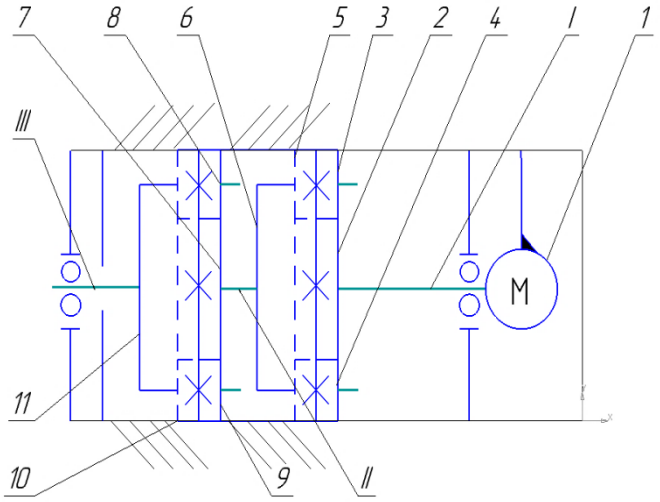


Рисунок 9 – Кинематическая схема двухступенчатого планетарного редуктора
1 – электродвигатель; 2, 7 – солнечное колесо; 3, 4, 8, 9 – сателлит; 5, 10 – эпицикл; 6, 11 – водило;
I – входной вал; II – промежуточный вал; III – выходной вал

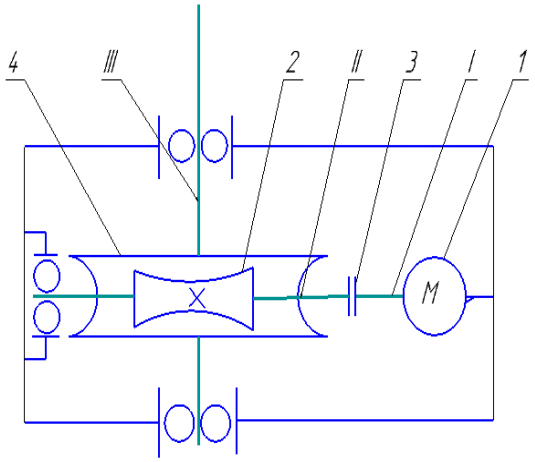


Рисунок 10 – Кинематическая схема червячного редуктора
1 – электродвигатель; 2 – червяк; 3 – муфта; 4 – червячное колесо;
I – входной вал; II – промежуточный вал; III – выходной вал

Требования для робототехнической платформы

Для установки манипулятора на робототехническую платформу и возможности его использования, необходимо, чтобы платформа отвечала следующим требованиям:

– соответствие платформы габаритным размерам манипулятора – 450 х 120 х 70 мм в сложенном состоянии;

– наличие посадочного места для «корзины» со сменным навесным оборудованием;

– наличие посадочного места для установки манипулятора;

– возможность установки поворотного шарнира в корпусе платформы;

– соответствие питания и интерфейса управления манипулятором.

Заключение

Проведен аналитический обзор, выявлены преимущества и недостатки существующих конструкций манипуляторов для мобильных платформ массой от 5 до 15 кг. Определена конфигурация и геометрические размеры звеньев манипулятора. Проведен силовой расчет и определены минимальные вращательные моменты в шарнирах, необходимые для подъема объекта массой 3 кг на

границе рабочей зоны. Проанализированы разные типы редукторов и определен тип редукторов в шарнирах манипулятора. Сформулированы требования к робототехнической платформе для установки и использования на ней предлагаемого манипулятора.

Предложенный манипулятор может быть использован на различных РТК массой от 5 до 15 кг, удовлетворяющих сформулированным требованиям. Сменное навесное оборудование позволит значительно расширить функциональные возможности РТК, а замена оборудования без дополнительного вмешательства (помимо оператора) существенно сократит время выполнения ряда задач.

1. Servosila Robotic Arms URL: https://www.servosila.com/en/roboticarms/
2. reSquared robotics URL: http://www.resquared.com/ products/manipulators/
3. EndeavorRobotics URL: http://endeavorrobotics.com/products#310-sugv
4. Dr. RoboT URL: http://jaguar.drrobot.com/specification_V6Arm.asp
5. М. Шахинпур. Курс робототехники / Издательство Мир, Москва, 1990.
6. Васильев А.С., Щукин П.О. Кинематические схемы. Учебное пособие для студентов инженерных вузов / Издательство ПетрГУ, Петрозаводск, 2013. URL: http://forest.petrsu.ru/courses/dm/kinematic_ schemes.pdf.

A.S. Gubankov, D.A. Yukhimets

IDENTIFICATION METHOD OF KINEMATIC PARAMETERS OF MULTILIK INDUSTRIAL MANIPULATOR

IACP FEB RAS, FEFU, Vladivostok
gubankov.as@dvfu.ru, undim@iacp.dvo.ru

Abstract

The paper deals with a method of identification of kinematic parameters of multilink industrial manipulators. This method does not require complex and expensive equipment for high-precision external measurements of position and orientation of the working tool in the absolute coordinate system. The method allows simple and cheap means to significantly increase the dynamic accuracy of the movement of working tools of serial manipulators along spatial trajectories during the performance of various technological operations. Model example is considered.

Key words: industrial manipulator, kinematic parameters, identification, high accuracy.

А.С. Губанков[1], Д.А. Юхимец[2]

МЕТОД ИДЕНТИФИКАЦИИ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МНОГОЗВЕННОГО ПРОМЫШЛЕННОГО МАНИПУЛЯТОРА

ИАПУ ДВО РАН, ДВФУ, г. Владивосток
gubankov.as@dvfu.ru, undim@iacp.dvo.ru

Аннотация

В работе предлагается метод идентификации кинематических параметров многозвенных промышленных манипуляторов, не требующий сложного и дорогостоящего оборудования для высокоточных внешних измерений положения и ориентации рабочего инструмента в абсолютной системе координат. Метод позволяет простыми и дешевыми средствами значительно увеличить динамическую точность движения рабочих инструментов серийных манипуляторов по пространственным траекториям при выполнении различных технологических операций. Рассмотрен модельный пример.

Ключевые слова: промышленный манипулятор, кинематические параметры, идентификация, высокая точность.

Введение

В настоящее время предложено множество методов синтеза и аппаратных решений для высокоточных систем управления приводами промышленных манипуляторов (ПМ), и они успешно используются в серийной технике. В результате, точность позиционирования рабочего инструмента ПМ в пространстве определяется в основном точностью кинематической модели многозвенника, так как контроллер ПМ определяет положение рабочего инструмента с использованием только этой модели и показаний датчиков углов поворота приводов ПМ. Большинство ПМ задействованы в операциях, не требующих высокой точности (в пределах 0.5 мм) позиционирования рабочего инструмента, что может быть обеспечено с помощью стандартной кинематической модели с номинальными параметрами, взятыми из технического описания ПМ. Однако на основе промышленных многозвенных манипуляторов можно реализовывать обрабатывающие комплексы, выполняющие операции фрезерования, сверления и т.п., которые обладают большой рабочей зоной, гибкостью в программировании и относительно небольшой стоимостью. В этом случае использование стандартной модели кинематики ПМ не позволяет обеспечить нужного качества выполнения указанных операций. Для уточнения параметров математической модели ПМ традиционно используются методики, основой которых являются внешние измерительные устройства [1-5]. В более ранний период это были различные устройства отслеживания линейных перемещений рабочего инструмента манипулятора [1], ультразвуковые и инфракрасные измерительные системы [2, 3], теодолиты и стереоскопическая триангуляция [4]. На современном этапе это высокоточные оптические сканеры, лазерные трекеры, контрольно-измерительные машины [5, 6]. Помимо неудобства использования на практике предлагаемых алгоритмов идентификации, основанных на статистическо-вероятностном подходе и требующих знания некоторых сложно определяемых параметров, например, матриц ковариации, эти методики обладают существенным недостатком – чрезмерной дороговизной используемого измерительного оборудования. Это оборудование часто недоступно на производстве или организации системному интегратору. В результате возникает задача разработки упрощенной процедуры идентификации параметров кинематической модели ПМ, не требующей использования дорогостоящего специализированного оборудования. Для замены данных от внешних высокоточных сенсоров, измеряющих положение рабочего инструмента ПМ, может быть использована процедура, аналогичная способу определения рабочей точки инструмента в типовых промышленных роботах. То есть будут использованы данные от их датчиков углов поворота приводов отдельных степеней подвижности при выходе рабочего органа ПМ в одну и туже точку пространства с разной ориентацией рабочего органа. На основе этой информации будет разработан метод идентификации параметров кинематической модели ПМ.

Постановка задачи

В работе будут рассматриваться промышленные манипуляторы типа PUMA, которые наиболее распространены в промышленности и используются для выполнения технологических операций. Кинематическая модель таких манипуляторов описывается с помощью уравнений вида [7]:

$$T_g(\mathbf{\Phi}, \boldsymbol{Q}) = \prod_{k=1}^{6} T_k, \quad (1)$$

где $T_g = \begin{bmatrix} R_g & X_g \\ O & 1 \end{bmatrix} \epsilon R^{4\times4}$ – матрица однородного преобразования, описывающая положение и ориентацию конечного звена манипулятора в абсолютной системе координат, связанной с основанием манипулятора; $R_g \epsilon R^{3\times3}$ – матрица ориентации последнего звена манипулятора в абсолютной системе координат; $X_g \epsilon R^{3\times1}$ – вектор координат последнего звена в абсолютной системе координат манипулятора; $O \epsilon R^{1\times3}$- нулевой вектор строка; $\mathbf{\Phi} = \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \vdots \\ \varphi_6 \end{bmatrix}, \varphi_i = (a_i, d_i, \alpha_i, \theta_i), i = \overline{(1,6)}$ – матрица параметров Денавита-Хартенберга; $\boldsymbol{Q} = (q_1,...,q_6)$ – вектор обобщенных координат (углов поворота приводов) манипулятора;

$T_i = \begin{bmatrix} \cos(q_i+\theta_i) & -\sin(q_i+\theta_i)\cos(\alpha_i) & \sin(q_i+\theta_i)\sin(\alpha_i) & a_i\cos(q_i+\theta_i) \\ \sin(q_i+\theta_i) & \cos(q_i+\theta_i)\cos(\alpha_i) & -\cos(q_i+\theta_i)\sin(\alpha_i) & a_i\sin(q_i+\theta_i) \\ 0 & \sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ – матрица Деннавита-Хартенберга.

Кинематическая модель (1) используется для решения прямой задачи кинематики, то есть для вычисления положения и ориентации последнего звена манипулятора на основе величин $\boldsymbol{Q}$ и $\boldsymbol{\Phi}$. При этом для планирования движений манипуляторов должна решаться обратная задача, заключающаяся в расчете желаемого вектора $\boldsymbol{Q}^*$, который соответствует желаемому положению и ориентации последнего звена манипулятора T_g^*:

$$\boldsymbol{Q}^* = F_{IKT}\left(T_g^*, \boldsymbol{\Phi}\right), \tag{2}$$

где $F_{IKT}()$ – функция решения обратной задачи кинематики. Функция (2) может быть реализована как с помощью аналитических выражений [8], так и с помощью итерационных алгоритмов численной оптимизации [9].

Выражения (1) и (2) используется контроллерами манипуляторов для вычисления положения и ориентации рабочих инструментов, а также желаемых углов поворота приводов манипуляторов. При этом в качестве кинематических параметров манипуляторов обычно используется матрица $\widetilde{\boldsymbol{\Phi}}$, соответствующая их номинальным геометрическим параметрам, приведенным в технической документации.

Однако точные кинематические параметры $\boldsymbol{\Phi}$ конкретного манипулятора могут отличаться от его номинальных параметров $\widetilde{\boldsymbol{\Phi}}$ вследствие неточности изготовления и соединения его механических элементов. В результате реальные параметры манипулятора отличаются от чертежа на некоторую малую величину:

$$\boldsymbol{\Phi} = \widetilde{\boldsymbol{\Phi}} + \boldsymbol{\Delta}. \tag{3}$$

Использование в (2) параметров $\widetilde{\boldsymbol{\Phi}}$ приводит к тому, что вместо вектора $\boldsymbol{Q}^*$, соответствующего желаемому значению T_g^* будет сформирован вектор $\widetilde{\boldsymbol{Q}^*}$, который будет отличаться от вектора $\boldsymbol{Q}^*$ на некоторую величину $\boldsymbol{\xi} = \boldsymbol{Q}^* - \widetilde{\boldsymbol{Q}}^*$. Наличие $\boldsymbol{\xi}$ приводит к тому, что при выводе всех приводов манипулятора в положение, соответствующее $\widetilde{\boldsymbol{Q}}^*$, последнее звено манипулятора будет находиться не в желаемом положении T_g^*, а в положении $\tilde{T}_g^*$, которое отличается на величину $\boldsymbol{\varepsilon} = T_g^* - \tilde{T}_g^*$. То есть отклонение параметров кинематической модели, используемой контроллером, от реальных параметров манипулятора, приводит к появлению ошибок позиционирования его конечного звена. Это особенно важно для случаев, когда траектория движения манипулятора рассчитывается автоматически, на основе информации, поступающей от внешних измерительных систем (лазерных или оптических сканеров, фотокамер и т.д.). При этом при расчете положения конечного звена манипулятора с использованием выражения (1), матрицы параметров $\widetilde{\boldsymbol{\Phi}}$ и $\widetilde{\boldsymbol{Q}^*}$ это расчетное положение будет совпадать с желаемым положением.

Уточнение кинематических параметров манипуляторов может производиться с помощью специальных измерительных систем, позволяющих с высокой точностью определять линейные и угловые координаты. Однако использование таких систем часто является невозможным из-за их высокой стоимости. При этом промышленные манипуляторы уже имеют высокоточную систему измерения углов поворотов их приводов, что можно использовать для вычисления их параметров.

Таким образом в работе ставится и решается следующая задача. Пусть имеется робот манипулятор типа PUMA, имеющий кинематические параметры, описываемые матрицей $\boldsymbol{\Phi}$. Контроллер манипулятора использует для решения прямой и обратной задачи манипулятора матрицу номинальных параметров $\widetilde{\boldsymbol{\Phi}}$, что приводит к появлению ошибки $\boldsymbol{\varepsilon}$ при позиционировании конечного звена манипулятора в абсолютной системе координат. Для уменьшения этой ошибки необходимо разработать метод оценки параметров манипулятора на основе серии измерений его обобщенных координат.

Метод идентификации кинематических параметров манипулятора

Эталонными данными для оценки матрицы **Φ** является *n* серий измерения векторов $\boldsymbol{Q}$. Каждая *i*-я серия измерений состоит из m_i векторов $\boldsymbol{Q}$, которые соответствуют положению манипулятора при выводе рабочей точки инструмента в одну и туже точку пространства X_i разной ориентацией (см. рисунок 1).

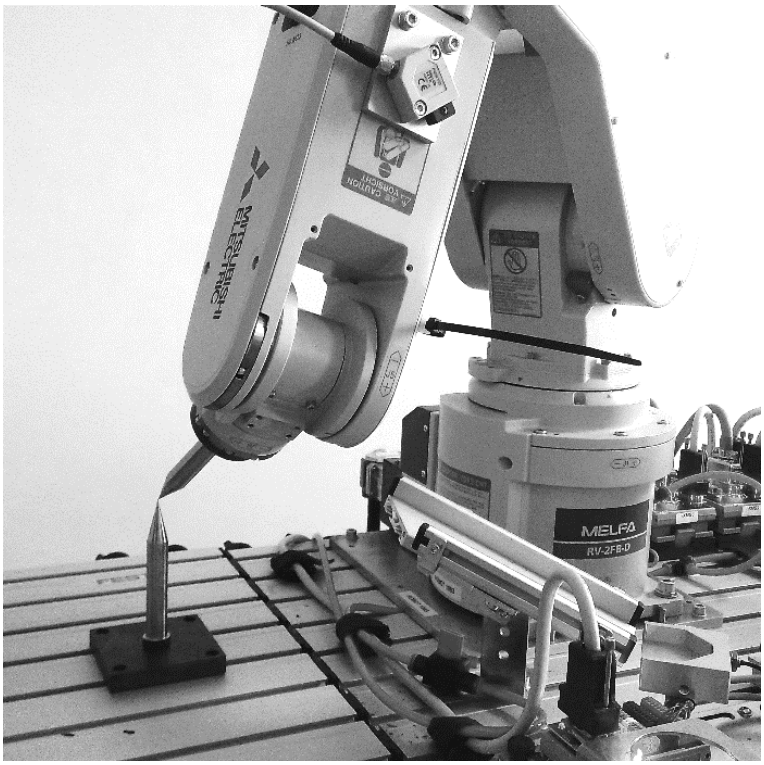


Рисунок 1 – Схема проведения измерений

При этом координаты точек $X_i, i = (\overline{1,n})$ неизвестны. Таким образом, в результате измерений формируется массив данных:

$$\boldsymbol{\Xi} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\Psi}_1 \\ \vdots \\ \boldsymbol{\Psi}_n \end{bmatrix}, \boldsymbol{\Psi}_i = \left(\boldsymbol{Q}_i^1, \dots, \boldsymbol{Q}_i^{mi}\right)^T, i = \left(\overline{1,n}\right). \quad (4)$$

Каждому вектору $\boldsymbol{Q}_i^j, i = \left(\overline{1,n}\right), j = (\overline{1,m_i})$ можно поставить в соответствие вектор $\tilde{X}_{t,i}^j$, который вычисляется на основе модели (1) с использованием матрицы $\widetilde{\boldsymbol{\Phi}}$ параметров. При этом выражение для вычисления $\tilde{X}_{t,i}^j$ будет иметь вид:

$$T_i^j(\widetilde{\boldsymbol{\Phi}}, \boldsymbol{Q}_i^j) = \left(\prod_{k=1}^{6} T_{k,i}^j\right) T_{tcp}, \quad (5)$$

где $T_{tcp} = \begin{bmatrix} I & X_{tcp} \\ O & 1 \end{bmatrix}$, $I \in R^{3\times3}$- единичная диагональная матрица; X_{tcp} – вектор координат рабочей точки инструмента в системе координат последнего звена манипулятора.

Координаты точек $\tilde{X}_{t,i}^j$ будут отличаться от реального положения рабочей точки манипулятора. При этом для каждого измерения в *i*-й серии измерений указанные координаты будут различны. Однако так как рабочий инструмент в каждой серии измерений выводится в одну и туже точку с неизвестными координатами, то и реальные координаты рабочей точки в одной серии измерений будут совпадать. Этот факт можно использовать для идентификации кинематических параметров манипулятора.

Оценку вектора параметров манипулятора можно осуществить, подбирая указанные параметры так, чтобы координаты $\tilde{X}_{t,i}^j$ для отдельной серии измерений сблизились на минимальное расстояние.

То есть оценку качества идентификации параметров манипулятора можно производить по следующему критерию:

$$J(\Xi, \widehat{\Phi}) = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m_i} \sum_{k=j+1}^{m_i} (\tilde{X}_{t,j}^{i} - \tilde{X}_{t,k}^{i})^2, \quad (6)$$

где $\widehat{\Phi}$ – оценка параметров манипулятора.

Выражение (6) не содержит реальных координат точек $X_{t,i}$, поэтому для оценки параметров манипулятора не требуется использования высокоточных измерительных систем. Таким образом, задача идентификации параметров манипулятора формулируется следующим образом:

$$\widehat{\Phi} = \text{agr}\min_{\Phi} J(\Xi, \widehat{\Phi}) \ . \quad (7)$$

Для оценки параметров манипулятора будет использоваться метод численной оптимизации Ливенберга-Маркгвардта [10]. Для этого исходные данные измерений необходимо представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} & r_p^i = \tilde{X}_{t,j}^{i} - \tilde{X}_{t,k}^{i}, i = \overline{(1,n)},\ j,k = \overline{(1,m_i)}, p = \overline{(1,l_i)}, \\ & R_i = \begin{bmatrix} r_1^i \\ \vdots \\ r_{l_i}^i \end{bmatrix}, l_i = \sum_{i=1}^{m_i} (m_i - j), \\ & \mathbf{P} = \begin{bmatrix} R_1 \\ \vdots \\ R_n \end{bmatrix} \in R^{3L}, L = \sum_{i=1}^{n} l_i. \end{aligned} \quad (8)$$

Критерий (6) с учетом (8) можно переписать в виде:

$$\text{J} = \frac{1}{2}\ \mathbf{P}^T \mathbf{P}. \quad (9)$$

При этом матрицу параметров манипулятора можно представить в следующем виде:

$$\boldsymbol{\vartheta} = \begin{bmatrix} {\varphi_1}^T \\ \vdots \\ {\varphi_6}^T \\ X_{tcp} \end{bmatrix} \in R^{27}. \quad (10)$$

Из выражения (10) видно, что в процессе идентификации будет оцениваться 27 параметров: 24 параметра описывают кинематику манипулятора, а 3 параметра описывают положение рабочей точки инструмента, закрепленного в последнем звене манипулятора.

Начальную оценку вектора X_{tcp} можно получить на основе массива данных $\boldsymbol{\Xi}$ с помощью метода наименьших квадратов. Для этого, запишем модель, описывающую зависимость вектора X_{tcp} от положения и ориентации последнего звена манипулятора. Величины X_{tcp} , X_g и R_g связаны между собой выражением:

$$X_g + R_g X_{tcp} = X_{prob}, \quad (11)$$

где X_{prob} – вектор координат рабочей точки инструмента манипулятора.

Перепишем выражение (11) в виде:

$$X_g + [R_g \quad I] \begin{bmatrix} X_{tcp} \\ -X_{prob} \end{bmatrix} = 0, \quad (12)$$

где $I \in \text{R}^{3x3}$ – единичная диагональная матрица.

Выражение (12) описывает модель, которая будет использована для оценки вектора X_{tcp}. Причем в модели (12) вектор неизвестных параметров содержит как вектор X_{tcp} так и вектор X_{prob}.

Для нахождения оценки векторов X_{tcp} и X_{prob} необходимо по выражению (1) с использованием матрицы $\widetilde{\Phi}$ рассчитать положение конечного звена и его ориентацию для каждого измерения и сформировать следующие массивы:

$$\boldsymbol{X} = \begin{bmatrix} X_1 \\ \vdots \\ X_n \end{bmatrix}, X_i = \begin{bmatrix} X_{g,j}^i \\ \vdots \\ X_{g,m_i}^i \end{bmatrix}, \boldsymbol{\Omega} = \begin{bmatrix} \Omega_1 \\ \vdots \\ \Omega_n \end{bmatrix}, \Omega_i = \begin{bmatrix} R_{g,j}^i & I \\ \vdots & \vdots \\ R_{g,m_i}^i & I \end{bmatrix}, i = \overline{(1,n)}, j = \overline{(1,m_i)}. \quad (13)$$

С использованием массивов X_i и Ω_i с помощью метода наименьших квадратов можно получить оценки вектора X_{tcp} для каждой серии измерений:

$$\boldsymbol{\Lambda}_i = (\boldsymbol{\Omega}_i{}^T \boldsymbol{\Omega}_i)^{-1} \boldsymbol{\Omega}_i{}^T \boldsymbol{X}_i, \quad (14)$$

где $\boldsymbol{\Lambda}_i = \begin{bmatrix} X_{tcp,i} \\ -X_{prob,i} \end{bmatrix}$.

Начальная оценка вектора X_{tcp} вычисляется по формуле:

$$\hat{X}_{tcp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} X_{tcp,i}. \quad (15)$$

Полученная оценка используется на начальной итерации алгоритма идентификации параметров манипулятора. В качестве указанного алгоритма используется метод Левенберга-Маргквардта, который оценивает вектор параметров с помощью следующих выражений:

$$\Delta\boldsymbol{\vartheta}(k) = -[\boldsymbol{G}^T\boldsymbol{G} + \mu(k)\boldsymbol{I}]^{-1}\boldsymbol{G}^T\boldsymbol{P},$$

$$\widehat{\boldsymbol{\vartheta}}(k+1) = \begin{cases} \widehat{\boldsymbol{\vartheta}}(k) + \boldsymbol{\Delta}\widehat{\boldsymbol{\vartheta}}(k), \mu(k+1) = \frac{\mu(k)}{\eta}, \text{если } J\left(\widehat{\boldsymbol{\vartheta}}(k) + \boldsymbol{\Delta}\widehat{\boldsymbol{\vartheta}}(k)\right) < J\left(\widehat{\boldsymbol{\vartheta}}(k)\right) \\ \widehat{\boldsymbol{\vartheta}}(k), \mu(k+1) = \frac{\mu(k)}{\eta}, \text{если } J\left(\widehat{\boldsymbol{\vartheta}}(k) + \boldsymbol{\Delta}\widehat{\boldsymbol{\vartheta}}(k)\right) > J\left(\widehat{\boldsymbol{\vartheta}}(k)\right) \end{cases}. \quad (16)$$

где $\boldsymbol{G} = \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial \boldsymbol{\vartheta}} \in R^{3L \times 27}$; $I \in R^{27\times 27}$ – единичная диагональная матрица; $\mu(k)$ – шаг настройки; $0<\eta<1$ - коэффициент изменения шага.

При этом на каждой итерации алгоритма вектор **P** обновляется на основе выражения (5) с использованием уточненного вектора параметров $\widehat{\boldsymbol{\vartheta}}(k)$.

Следует отметить, что использование критерия (6) не позволяет определить параметры θ_1 и d_1. Это объясняется тем, что параметр d_1 описывает смещение первого шарнира по координате z базовой системы координат и компонент $\frac{\partial \boldsymbol{X}_i^j}{\partial d_1} = [0,0,1]$ для всех измерений. Поэтому соответствующий компонент матрицы $\boldsymbol{G}$ для параметра d_1 будет равен 0, а, следовательно, настройка этого коэффициента невозможна. Параметр θ_1 соответствует начальному углу поворота первого звена и влияет на координаты точек X_{prob}, однако не влияет на расстояния между измерениями (точками X_i^j). Поэтому без знания точного положения точек X_{prob}, указанный параметр настраивать нецелесообразно.

В результате работы алгоритма (11) формируется оценка вектора $\widehat{\boldsymbol{\vartheta}}$ параметров манипулятора, которые обеспечивают схождение точек $\tilde{X}_{gi}^j$ на минимальное расстояние между собой в *i*-й серии измерений. Использование рассчитанных кинематических параметров манипулятора в его контроллере вместо номинальных параметрах позволит увеличить точность позиционирования рабочего инструмента манипулятора в абсолютной системе координат.

Результаты численных экспериментов

Для проверки предложенного метода идентификации кинематических параметров промышленного манипулятора был проведен численный эксперимент. В эксперименте рассматривался манипулятор Mitsubishi RV-2FB, кинематическая схема которого показа на рисунке 2.

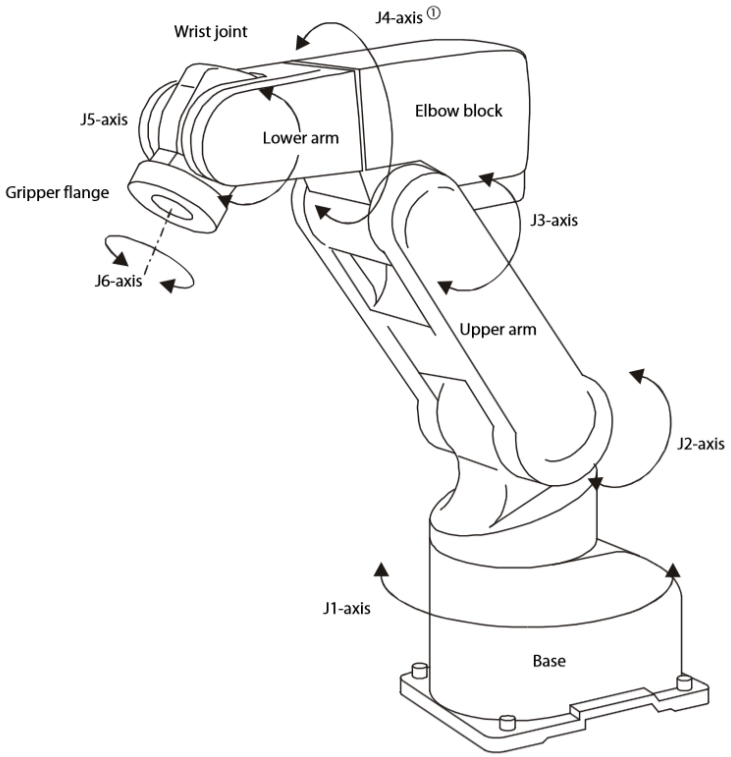


Рисунок 2 – Кинематическая схема робота манипулятора Mitsubishi RV-2FB

Матрица номинальных кинематических параметров робота имеет вид:

$$\tilde{\mathbf{\Phi}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 295 & -\pi/2 \\ -\pi/2 & 230 & 0 & 0 \\ -\pi/2 & 50 & 0 & -\pi/2 \\ 0 & 0 & 270 & \pi/2 \\ 0 & 0 & 0 & -\pi/2 \\ \pi & 0 & 70 & 0 \end{bmatrix}.$$

Вектор X_{tcp} имел следующее значение $[0, 0, 109]^T$. Для генерации исходного массива данных $\mathbf{\Xi}$ использовалась матрица кинематических параметров, отличающаяся от $\tilde{\mathbf{\Phi}}$ на величину $\boldsymbol{\Delta}$, имеющую вид:

$$\boldsymbol{\Delta} = \begin{bmatrix} 0 & 0.4 & 0 & 0.002 \\ 0.002 & -0.4 & 0.4 & -0.003 \\ -0.003 & 0.3 & 0 & 0.004 \\ 0.002 & 0.2 & 0 & 0.003 \\ 0.003 & 0 & 0 & -0.002 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Массив $\mathbf{\Xi}$ содержал 4 серии измерений, соответствующих подходу рабочего инструмента с разной ориентацией к точкам с координатами $X_{prob,1}=[7, -317, 106]^T$, $X_{prob,2}=[-366, 10, 106]^T$, $X_{prob,3}=[20, 300, 106]^T$, $X_{prob,4}=[200, 200, 106]^T$. Для каждого измерения с помощью алгоритма решения обратной задачи кинематики рассчитывался вектор $Q_j^i, i = \overline{(1,4)}, j = \overline{(1,10)}$.

Далее с использованием матрицы номинальных параметров $\tilde{\mathbf{\Phi}}$ и массива $\mathbf{\Xi}$ по выражениям (13)-(15) был рассчитан вектор $\tilde{X}_{tcp}=[0.22, -0.0016, 108.87]^T$.

Рассчитанные данные были использованы для проведения идентификации кинематических параметров описанным ранее методом. Изменение значения критерия (9) в зависимости от количества итераций показано на рисунке 3.

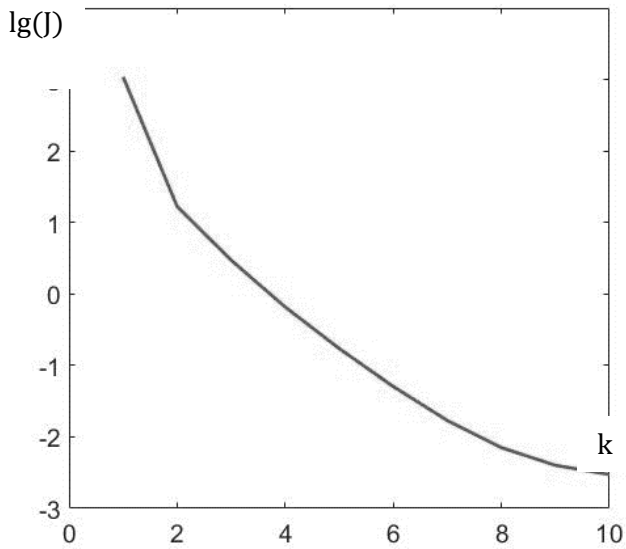


Рисунок 3 – Процесс изменения критерия (9) в процессе идентификации

Из представленного рисунка видно, что алгоритм идентификации завершается за 10 итераций, а величина критерия (9) снижается с 1089.7 до 0.003, что говорит о высокой скорости и точности настройки. При этом ошибка в определении параметров манипулятора имеет значение:

$$E = \mathbf{\Phi} - \hat{\mathbf{\Phi}} = \begin{bmatrix} 0 & 1.9 \cdot 10^{-5} & 0 & 1.33 \cdot 10^{-6} \\ 2.52 \cdot 10^{-6} & -4.1 \cdot 10^{-4} & 0.2 & 1.9 \cdot 10^{-6} \\ -2.9 \cdot 10^{-6} & -5.0 \cdot 10^{-5} & -0.2 & 2.3 \cdot 10^{-7} \\ -2.4 \cdot 10^{-7} & 9.56 \cdot 10^{-6} & 0 & 1.3 \cdot 10^{-6} \\ 1.79 \cdot 10^{-7} & 0 & 0 & 7.3 \cdot 10^{-7} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Также в результате идентификации была определена величина $\hat{X}_{tcp} = [1.542 \cdot 10^{-4}, 0.0016, 109.0006]^{\mathrm{T}}$.

Как видно из полученных значений ошибка определения кинематических параметров d_2 и d_3 составляет 0.2 мм. Указанные параметры описывают смещение вдоль осей второй и третьей степеней подвижности, которые расположены на одном звене (см. рисунок 2). Поэтому на кинематику манипулятора влияет суммарное смещение в третьей степени подвижности, и из-за этого отдельно указанные параметры идентифицировать нельзя. Суммарное значение идентифицированных параметров $\hat{d}_2$ и $\hat{d}_3$ равно 0.4 мм, что соответствует сумме параметров d_2 и d_3, то есть идентификация прошла корректно.

На рисунке 4 показано отклонение координат рабочей точки манипулятора, рассчитанных по модели (5) с использованием идентифицированных параметров $\hat{\mathbf{\Phi}}$, от их истинных значений (сплошная черная линия – отклонение по координате x, пунктирная черная – по координате y, а серая по координате z).

Из рисунка 4 видно, что точность идентификации параметров манипулятора позволяет, вычислять положение рабочего инструмента с точностью до 0.0033 мм по отдельным координатам. Такой точности достаточно для выполнения любых технологических операций.

Для сравнения на рисунке 5 показано отклонение координат, рассчитанных по модели (5) с использованием номинальных параметров, от их истинных значений (сплошная черная линия – отклонение по координате x, пунктирная черная – по координате y, а серая по координате z).

Из рисунка 5 видно, что при использовании номинальных параметров точность расчета резко падает и может достигать нескольких миллиметров по отдельным координатам, что является недопустимым при выполнении ответственных технологических операций.

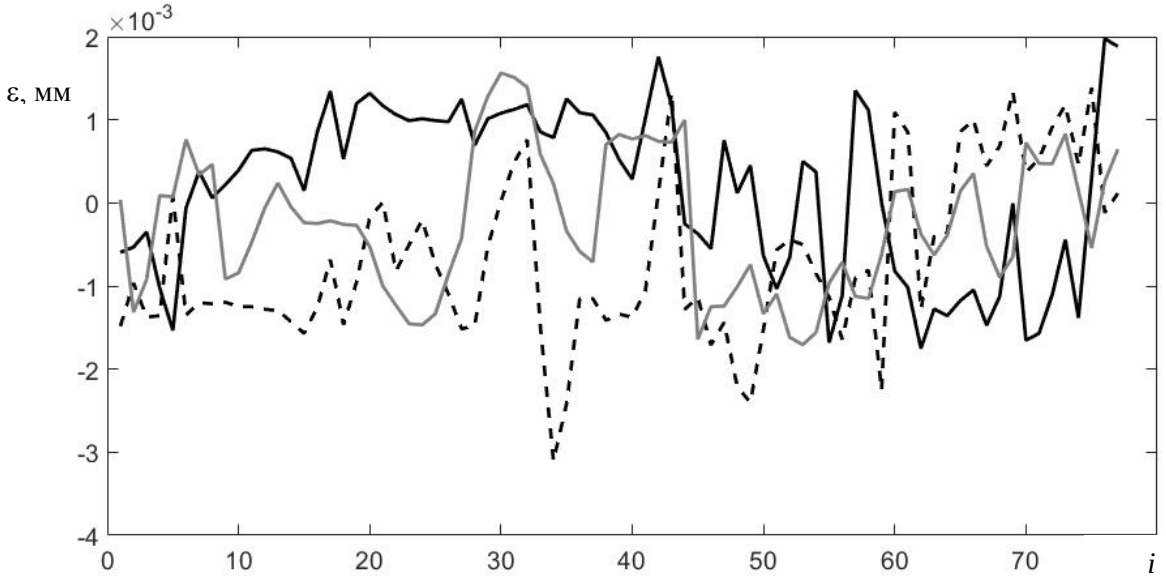


Рисунок 4 – Отклонение координат рабочей точки манипулятора, рассчитанных по модели (5) с использованием идентифицированных параметров $\widehat{\mathbf{\Phi}}$, от их истинных значений

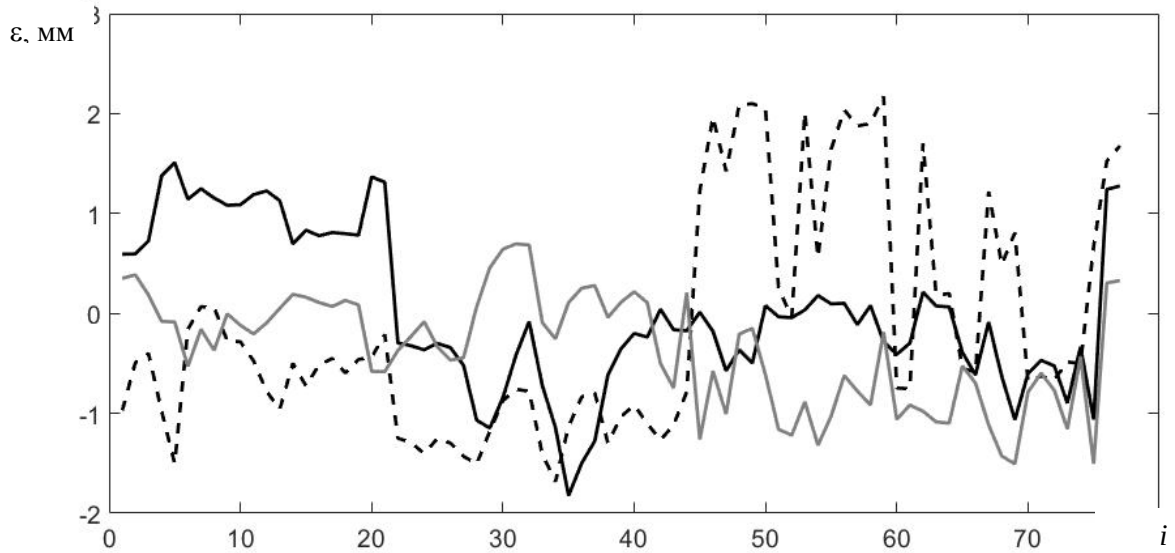


Рисунок 5 – Отклонение координат, рассчитанных по модели (5) с использованием номинальных параметров, от их истинных значений

Таким образом, результаты численного эксперимента подтвердили работоспособность и эффективность предложенного метода идентификации кинематических параметров многозвенного манипулятора.

Выводы

В докладе предлагается метод идентификации кинематических параметров многозвенного манипулятора, не требующий использования внешних высокоточных измерительных систем. Предлагаемый метод состоит из двух этапов. На первом этапе с помощью пульта оператора происходит вывод инструмента с разной ориентацией в одну и туже фиксированную точку пространства и запись данных об углах поворота приводов манипулятора. На втором этапе с помощью метода Левенберга — Марквардта выполняется настройка кинематических параметров модели манипулятора так, чтобы уменьшить расстояния между положениями инструмента, рассчитанными на основе математической модели этого манипулятора с использованием сохраненных данных об углах

поворота приводов. В результате выполнения предложенной процедуры можно уточнить кинематические параметры и тем самым, как показали результаты исследований, существенно увеличить точность движения манипулятора в абсолютной системе координат.

Работа поддержана Минобрнауки (Госзадание №2.11216.2018/11.12) и грантом РФФИ (16-37-60025).

1. Renders J.M., Rossignol E., Becquet M., Hanus R. 1991 Kinematic calibration and geometrical parameter identification for robots // IEEE Transactions on Robotics and Automation. – 1991. - Vol. 7. - №6. - P. 721-732.
2. Stone H.W., Sanderson A.S. A prototype arm signature identification system // Proc. IEEE Int. Conf. Robotics Automat. (Raleigh, NC). – 1987. P. 175-182.
3. Hollerbach J. M., Bennet D.J. Automatic kinematic calibration using a motion tracking system // Robotics Res. 4th Int. Symp. Cambridge, MA: MIT Press. – 1988. – P. 191-198.
4. Whitney D.E., Lozinski C.A., Rourke J.M. Industrial robot forward calibration method and results // ASME J. Dynamic Systems, Measurements Control. – 1986. – Vol. 108. – P. 1-8.
5. Kolyubin S., Paramonov P., Shiriaev A. Robot Kinematics Identification: KUKA LWR4+ Redundant Manipulator Example // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conference Series. – 2015. – Vol. 659, 012011. P. 1-12.
6. Klimchik A., Pashkevich A., Wu Y., Caro S., Furet B. Design of calibration experiments for identification of manipulator elastostatic parameters // J. of Mechanics Engineering and Automation. – 2012. – Vol. 2. – P. 531-542.
7. Фу. К., Гонсалес Р., Ли К. Робототехника // М.: Мир, 1989. 624 с.
8. Филаретов В.Ф., Алексеев Ю.К., Лебедев А.В. Системы управления подводными роботами // Под ред. В.Ф. Филаретова. М.: Круглый год, 2001. 288 с.
9. Ersu E., Nungesser D. A numerical solution of the general kinematic problem // Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation. 13-15 March 1984, Atlanta, USA. Vol. 1. P. 162-168.
10. Гилл Ф., Мюррей У., Райт М. Практическая оптимизация (Practical optimization). - М.: Мир, 1985. - 509 с.

V.E. Pavlovsky, D.A. Gribkov, I.A. Orlov,
A.V. Podoprosvetov, E.Yu. Kolesnichenko

MOBILE MANIPULATOR ON SIX-WHEEL MECANUM PLATFORM

[1]*Keldysh Institute of Applied Mathematics of RAS, Moscow*
vlpavl@mail.ru, orlovbel@gmail.com, decstrela@mail.ru
[2]*Lomonossov Moscow State University, mathematical-mechanics faculty, Moscow*
legovas@gmail.com,llecxis@gmail.com

Abstract

The research describes the layout of the mobile manipulator on six-wheel mecanum platform. This system has a large number of degrees of freedom (DOF) and is kinematically redundant, but it is because of this fact that it is able to solve a very wide class of problems of manipulation of objects and motion in space, including in cramped environments.

Key words: mobile manipulator, omni robot, mecanum platform, mecanum-wheel.

В.Е. Павловский, Д.А. Грибков, И.А. Орлов,
А.В. Подопросветов, Е.Ю. Колесниченко

МОБИЛЬНЫЙ МАНИПУЛЯТОР НА ШЕСТИКОЛЕСНОЙ МЕКАНУМ-ПЛАТФОРМЕ

[1]*ФИЦ ИПМ им.М.В.Келдыша РАН, Москва*
vlpavl@mail.ru, orlovbel@gmail.com, decstrela@mail.ru
[2]*МГУ им.М.В.Ломоносова механико-математический факультет, Москва*
legovas@gmail.com, llecxis@gmail.com

Аннотация

Описывается исследовательский макет мобильного манипулятора на шестиколесной меканум-платфоме. Эта система обладает большим числом степеней свободы и является кинематически избыточной, но именно в силу этого обстоятельства способна решать весьма широкий класс задач манипулирования предметами и движения в пространстве, в том числе в стесненных средах.

Ключевые слова: мобильный манипулятор, омни-робот, меканум-платформа, меканум-колесо.

Введение

Машины, мобильные аппараты и роботы, построенные по кинематическим схемам мобильных манипуляторов [1-10], т.е. манипуляторов на мобильных шасси, приобретают большое значение в технике, строительстве, при выполнении специальных операций. На рис.1, 2 показаны некоторые примеры таких машин.

Рисунок 1 – Мобильный кран-манипулятор

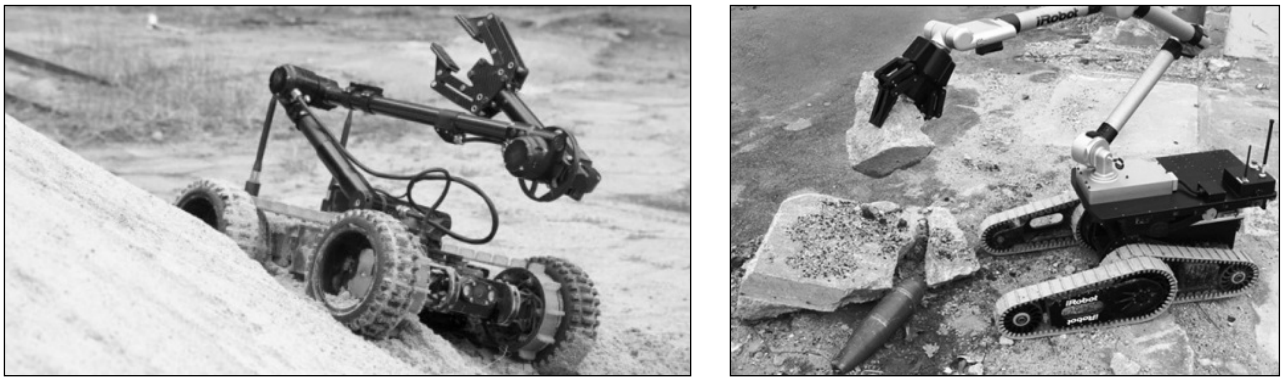


Рисунок 2 – Мобильные роботы-манипуляторы, подрывники

Приведенные примеры очевидно показывают, как важна для машин типа показанных высокая подвижность. Можно сформулировать техническое предложение, что оснащение таких машин не обычными колесными или гусеничными шасси, а омни-мобильным шасси повысит их двигательные и манипуляционные возможности.

Макет такого робота разработан и представляется в настоящей работе. Робот показан на рис.3, показаны его САПР-модель и реальное фото. Робот был назван М-робот.

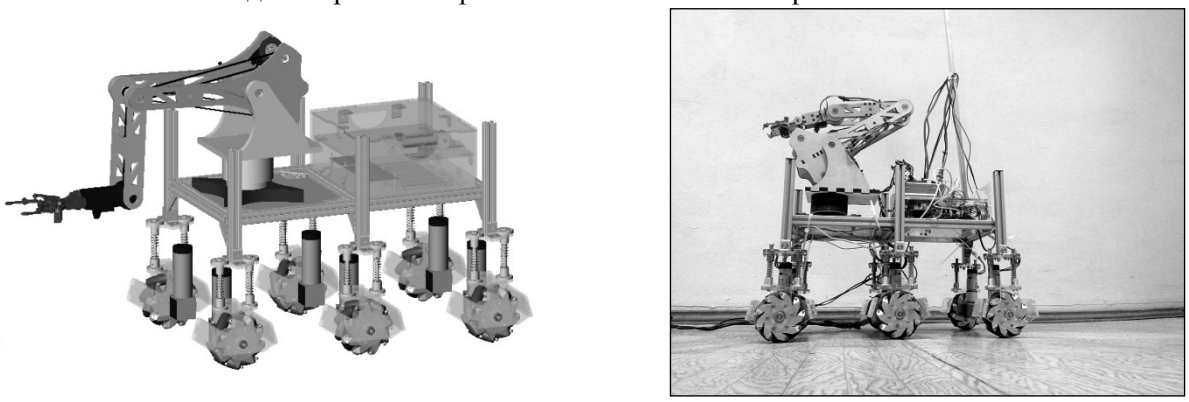


Рисунок 3 – М-робот, САПР-модель (слева) и реальный образец

Опишем далее методы синтеза кинематического управления роботом. Такой подход оправдан при достаточно медленных движениях робота.

Манипулятор

Подробнее манипулятор показан на рис.4. У манипулятора есть особенность – третье и четвертое звенья (считая от основания) кинематически связаны между собой (в манипуляторе они связаны специальной ременной передачей) и не могут двигаться независимо. Но этот факт имеет и положительное значение, в ряде случаев упрощает расчеты.

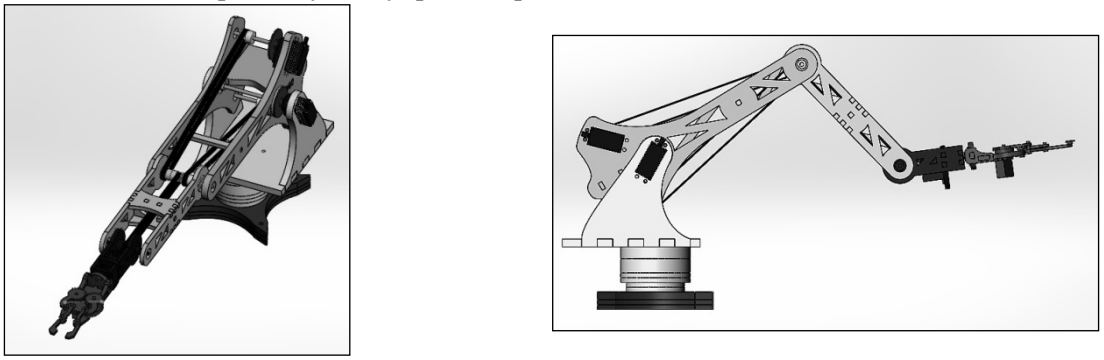


Рисунок 4 – Манипулятор М-робота

Опишем кратко кинематику манипулятора. Основные задачи кинематики манипулятора – прямая и обратная задачи кинематики.

Для описания вращательных и поступательных связей между соседними звеньями манипулятора воспользуемся методом Денавита-Хартенберга (ДХ) [1] - матричным методом последовательного построения систем координат (СК), связанных с каждым звеном кинематической цепи.

Известно, что каждая СК формируется на основе правил, описанных ниже.

Свяжем с основанием робота (звеном "*0*") систему отсчета $СК_0$. Эта система отсчета неподвижна, в задаче о кинематическом описании роботизированной руки ее можно рассматривать как опорную систему отсчета. Положения систем отсчета всех остальных звеньев однозначно определяются через нее. Система отсчета $СК_0$ строится, вообще говоря, произвольно. В целях упрощения рассуждений ось Z_0 обычно совмещают с осью 1-го сочленения, а начало координат этой системы располагают так, чтобы при равенстве нулю 1-й обобщенной координаты (угла или смещения в сочленении) система отсчета $СК_0$ совпадала с системой отсчета $СК_1$. Далее этот процесс продолжается аналогичным образом. В результате возникают 6 систем координат $СК_0$ - $СК_5$, показанные на рис.5.

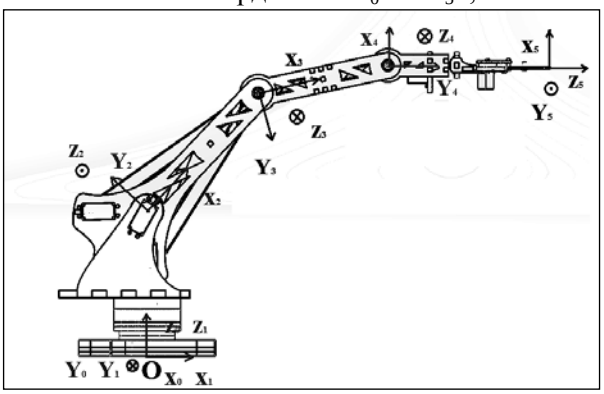


Рисунок 5 – Системы координат манипулятора М-робота

Прямая задача кинематики. Во введенных $СК_0$ - $СК_5$ следующим образом решается прямая задача кинематики манипулятора. Пусть матрица *T* задает положение и ориентацию схвата манипулятора в абсолютной системе координат (тем самым задает решение прямой задачи кинематики), она рассчитывается как последовательное перемножение матриц перехода от $СК_{i-1}$ к $СК_i$ и в окончательном виде имеет структуру:

$$T = \begin{pmatrix} n & s & a & p \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} n_x & s_x & a_x & p_x \\ n_y & s_y & a_y & p_y \\ n_z & s_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

где основные параметры этой матрицы имеют смысл:

n – вектор нормали к схвату,

s – касательный вектор схвата, лежащий в плоскости пальцев схвата и указывающий направление пх движения,

a – вектор, задающий направление схвата,

p – вектор положения схвата, этот вектор соединяет начало базовой СК с началом схвата.

Все расчеты выполнялись различными программными системами, в том числе "Wolfram Mathematica" и оказались достаточно эффективными.

Обратная задача кинематики. В случае М-робота обратная задача кинематики, благодаря специфической конструкции манипулятора, имеет аналитическое решение. Оно позволяет получить функциональные зависимости, которые при программной реализации дают быстрое преобразование координат и возможность как аппаратной аналоговой, так и цифровой реализации преобразователя координат в системе управления. Эти решения достаточно громоздки, например, на рис.6 приведено аналитическое решение для одного из углов манипулятора (получено в компьютерной системе аналитических преобразований), но вполне могут быть реализованы "на борту" манипулятора.

```
phi31 =
 -ArcCos[
   (-4 l1^3 l3 + 4 l1 l2^2 l3 - 4 l1 l3^3 - 4 l1^3 l4 + 4 l1 l2^2 l4 - 12 l1 l3^2 l4 - 12 l1 l3 l4^2 - 4 l1 l4^3 + 4 l1^3 r13 rx - 4 l1 l2^2 r13 rx + 12 l1 l3^2 r13 rx + 24 l1 l3 l4 r13 rx +
      12 l1 l4^2 r13 rx - 4 l1 l3 rx^2 - 4 l1 l4 rx^2 - 8 l1 l3 r13^2 rx^2 - 8 l1 l4 r13^2 rx^2 + 4 l1 r13 rx^3 + 4 l1^3 r23 ry - 4 l1 l2^2 r23 ry + 12 l1 l3^2 r23 ry + 24 l1 l3 l4 r23 ry +
      12 l1 l4^2 r23 ry - 16 l1 l3 r13 r23 rx ry - 16 l1 l4 r13 r23 rx ry + 4 l1 r23 rx^2 ry - 4 l1 l3 ry^2 - 4 l1 l4 ry^2 - 8 l1 l3 r23^2 ry^2 - 8 l1 l4 r23^2 ry^2 + 4 l1 r13 rx ry^2 +
      4 l1 r23 ry^3 + 4 l1^3 r33 rz - 4 l1 l2^2 r33 rz + 12 l1 l3^2 r33 rz + 24 l1 l3 l4 r33 rz + 12 l1 l4^2 r33 rz - 16 l1 l3 r13 r33 rx rz - 16 l1 l4 r13 r33 rx rz +
      4 l1 r33 rx^2 rz - 16 l1 l3 r23 r33 ry rz - 16 l1 l4 r23 r33 ry rz + 4 l1 r33 ry^2 rz - 4 l1 l3 rz^2 - 4 l1 l4 rz^2 - 8 l1 l3 r33^2 rz^2 - 8 l1 l4 r33^2 rz^2 + 4 l1 r13 rx rz^2 +
      4 l1 r23 ry rz^2 + 4 l1 r33 rz^3 -
      Sqrt[(4 l1^3 l3 - 4 l1 l2^2 l3 + 4 l1 l3^3 + 4 l1^3 l4 - 4 l1 l2^2 l4 + 12 l1 l3^2 l4 + 12 l1 l3 l4^2 + 4 l1 l4^3 - 4 l1^3 r13 rx + 4 l1 l2^2 r13 rx - 12 l1 l3^2 r13 rx -
            24 l1 l3 l4 r13 rx - 12 l1 l4^2 r13 rx + 4 l1 l3 rx^2 + 4 l1 l4 rx^2 + 8 l1 l3 r13^2 rx^2 + 8 l1 l4 r13^2 rx^2 - 4 l1 r13 rx^3 - 4 l1^3 r23 ry + 4 l1 l2^2 r23 ry -
            12 l1 l3^2 r23 ry - 24 l1 l3 l4 r23 ry - 12 l1 l4^2 r23 ry + 16 l1 l3 r13 r23 rx ry + 16 l1 l4 r13 r23 rx ry - 4 l1 r23 rx^2 ry + 4 l1 l3 ry^2 + 4 l1 l4 ry^2 +
            8 l1 l3 r23^2 ry^2 + 8 l1 l4 r23^2 ry^2 - 4 l1 r13 rx ry^2 - 4 l1 r23 ry^3 - 4 l1^3 r33 rz + 4 l1 l2^2 r33 rz - 12 l1 l3^2 r33 rz - 24 l1 l3 l4 r33 rz - 12 l1 l4^2 r33 rz +
            16 l1 l3 r13 r33 rx rz + 16 l1 l4 r13 r33 rx rz - 4 l1 r33 rx^2 rz + 16 l1 l3 r23 r33 ry rz + 16 l1 l4 r23 r33 ry rz - 4 l1 r33 ry^2 rz + 4 l1 l3 rz^2 +
            4 l1 l4 rz^2 + 8 l1 l3 r33^2 rz^2 + 8 l1 l4 r33^2 rz^2 - 4 l1 r13 rx rz^2 - 4 l1 r23 ry rz^2 - 4 l1 r33 rz^3)^2 -
         4 (4 l1^2 l3^2 + 8 l1^2 l3 l4 + 4 l1^2 l4^2 - 8 l1^2 l3 r13 rx - 8 l1^2 l4 r13 rx + 4 l1^2 rx^2 - 8 l1^2 l3 r23 ry - 8 l1^2 l4 r23 ry + 4 l1^2 ry^2 - 8 l1^2 l3 r33 rz - 8 l1^2 l4 r33 rz + 4 l1^2 rz^2)
          (l1^4 - 2 l1^2 l2^2 + l2^4 + 2 l1^2 l3^2 - 2 l2^2 l3^2 + l3^4 + 4 l1^2 l3 l4 - 4 l2^2 l3 l4 + 4 l3^3 l4 + 2 l1^2 l4^2 - 2 l2^2 l4^2 + 6 l3^2 l4^2 + 4 l3 l4^3 + l4^4 - 4 l1^2 l3 r13 rx +
            4 l2^2 l3 r13 rx - 4 l3^3 r13 rx - 4 l1^2 l4 r13 rx + 4 l2^2 l4 r13 rx - 12 l3^2 l4 r13 rx - 12 l3 l4^2 r13 rx - 4 l4^3 r13 rx - 2 l1^2 rx^2 - 2 l2^2 rx^2 + 2 l3^2 rx^2 +
            4 l3 l4 rx^2 + 2 l4^2 rx^2 + 4 l1^2 r13^2 rx^2 + 4 l3^2 r13^2 rx^2 + 8 l3 l4 r13^2 rx^2 + 4 l4^2 r13^2 rx^2 - 4 l3 r13 rx^3 - 4 l4 r13 rx^3 + rx^4 - 4 l1^2 l3 r23 ry +
            4 l2^2 l3 r23 ry - 4 l3^3 r23 ry - 4 l1^2 l4 r23 ry + 4 l2^2 l4 r23 ry - 12 l3^2 l4 r23 ry - 12 l3 l4^2 r23 ry - 4 l4^3 r23 ry + 8 l1^2 r13 r23 rx ry + 8 l3^2 r13 r23 rx ry +
            16 l3 l4 r13 r23 rx ry + 8 l4^2 r13 r23 rx ry - 4 l3 r23 rx^2 ry - 4 l4 r23 rx^2 ry - 2 l1^2 ry^2 - 2 l2^2 ry^2 + 2 l3^2 ry^2 + 4 l3 l4 ry^2 + 2 l4^2 ry^2 + 4 l1^2 r23^2 ry^2 +
            4 l3^2 r23^2 ry^2 + 8 l3 l4 r23^2 ry^2 + 4 l4^2 r23^2 ry^2 - 4 l3 r13 rx ry^2 - 4 l4 r13 rx ry^2 + 2 rx^2 ry^2 - 4 l3 r23 ry^3 - 4 l4 r23 ry^3 + ry^4 - 4 l1^2 l3 r33 rz +
            4 l2^2 l3 r33 rz - 4 l3^3 r33 rz - 4 l1^2 l4 r33 rz + 4 l2^2 l4 r33 rz - 12 l3^2 l4 r33 rz - 12 l3 l4^2 r33 rz - 4 l4^3 r33 rz + 8 l1^2 r13 r33 rx rz + 8 l3^2 r13 r33 rx rz +
            16 l3 l4 r13 r33 rx rz + 8 l4^2 r13 r33 rx rz - 4 l3 r33 rx^2 rz - 4 l4 r33 rx^2 rz + 8 l1^2 r23 r33 ry rz + 8 l3^2 r23 r33 ry rz + 16 l3 l4 r23 r33 ry rz +
            8 l4^2 r23 r33 ry rz - 4 l3 r33 ry^2 rz - 4 l4 r33 ry^2 rz - 2 l1^2 rz^2 - 2 l2^2 rz^2 + 2 l3^2 rz^2 + 4 l3 l4 rz^2 + 2 l4^2 rz^2 + 4 l1^2 r33^2 rz^2 + 4 l3^2 r33^2 rz^2 +
            8 l3 l4 r33^2 rz^2 + 4 l4^2 r33^2 rz^2 - 4 l3 r13 rx rz^2 - 4 l4 r13 rx rz^2 + 2 rx^2 rz^2 - 4 l3 r23 ry rz^2 - 4 l4 r23 ry rz^2 + 2 ry^2 rz^2 - 4 l3 r33 rz^3 - 4 l4 r33 rz^3 + rz^4)))/
      (2 (4 l1^2 l3^2 + 8 l1^2 l3 l4 + 4 l1^2 l4^2 - 8 l1^2 l3 r13 rx - 8 l1^2 l4 r13 rx + 4 l1^2 rx^2 - 8 l1^2 l3 r23 ry - 8 l1^2 l4 r23 ry + 4 l1^2 ry^2 - 8 l1^2 l3 r33 rz - 8 l1^2 l4 r33 rz + 4 l1^2 rz^2))]
```

Рисунок 6 – Обратная кинематическая задача для одного угла манипулятора

Меканум-шасси

В М-роботе в конструкции шасси - по результатам большой серии экспериментов - применена независимая упругая подвеска меканум-колес. Схема подвески одного колеса приведена на рис.7. Наличие упругих элементов в подвеске позволяет роботу проходить небольшие препятствия на поверхности передвижения – в пределах хода подвески до (примерно) 10 см по высоте.

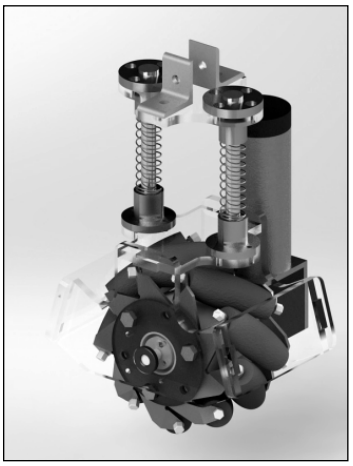


Рисунок 7 – Схема подвески колеса М-робота

Далее опишем кинематику робота на шести меканум-колесах. Подробное решение этой задачи было дано авторами в [7-10], здесь для замыкания работы дадим краткое изложение. Пусть корпус шасси представляет собой прямоугольную платформу со сторонами $L \times l$ (для определенности $L > l$) и вдоль его длинных сторон расположены меканум-колеса, как показано на рис.8.

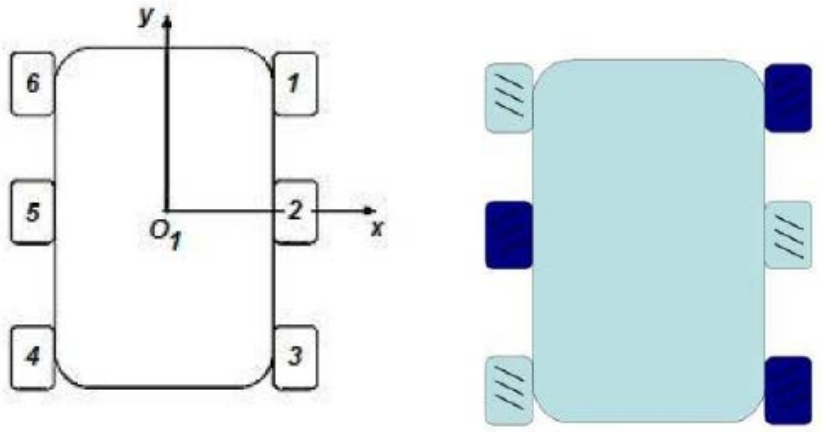


Рисунок 8 – Шестиколесный робот

Свяжем с его центром O_1 систему координат так, чтобы оси O_1x и O_1y были осями симметрии робота (см. рис.2). Оси всех шести колес параллельны оси O_1x. Координаты центров $A_i, i=1\ldots6$ в этой системе координат следующие:

$$A_1\left(\frac{l}{2};\frac{L}{2}\right), A_2\left(\frac{l}{2};0\right), A_3\left(\frac{l}{2};-\frac{L}{2}\right), A_4\left(-\frac{l}{2};-\frac{L}{2}\right), A_5\left(-\frac{l}{2};0\right), A_6\left(-\frac{l}{2};\frac{L}{2}\right).$$

Нумерация колес изображена на рис.8. Углы отклонения осей роликов от осей колес либо 45, либо -45 градусов.

Согласно [4] уравнение для одного меканум-колеса имеет следующий вид:

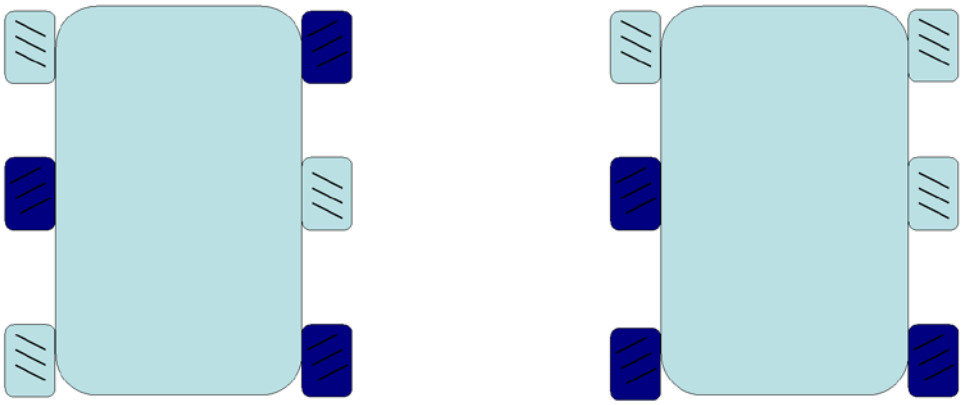
$$\dot{q} = -\frac{1}{r\sin\delta}\left(\sin(\alpha+\delta)\left(v_y+\omega a_x\right)+\cos(\alpha+\delta)\left(v_x-\omega a_y\right)\right)$$

где $\dot{q}$ – угловая скорость колеса, r – его радиус, δ – угол отклонения оси ролика от оси колеса, α – угол отклонения оси колеса от оси O_1x, (v_x, v_y, ω) – линейные и угловая скорости робота, (a_x, a_y) – координаты центра колеса.

Для рассматриваемого в данной статье робота выполнено условие $\alpha = 0$ для всех колес. Тогда угловые скорости колес в нашем случае выражаются следующим образом:

$$\begin{pmatrix} q_1 \\ \vdots \\ q_6 \end{pmatrix} = -\frac{1}{r}M\begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega \end{pmatrix},\ M = \begin{pmatrix} ctg\,\delta_1 & 1 & a_{1x}-a_{1y}ctg\,\delta_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ ctg\,\delta_6 & 1 & a_{6x}-a_{6y}ctg\,\delta_6 \end{pmatrix} \quad (1)$$

где (a_{ix}, a_{iy}) – координаты центров $A_i, i=1\ldots6$. Уравнения (1) задают обратную кинематическую задачу. В зависимости от углов $\delta_i, i=1\ldots6$ матрица M имеет разный вид. Ниже приведены неэквивалентные друг другу варианты того, как могут располагаться меканум-колеса в зависимости от углов $\delta_i, i=1\ldots6$. Прямоугольниками с темной заливкой и штриховкой вправо выделеныы колеса, для которых $\delta = 45°$, а со светлой заливкой и штриховкой влево – колеса с $\delta = -45°$. Под каждым вариантом по (1) выписана соответствующая матрица M для решения обратной кинематической задачи, подсчитанная для данного случая. Варианты компоновок перенумерованы и матрицы соответствуют этой нумерации.



1. 2.

1. $M = \begin{pmatrix} 1 & 1 & l/2 - L/2 \\ -1 & 1 & l/2 \\ 1 & 1 & l/2 + L/2 \\ -1 & 1 & -l/2 - L/2 \\ 1 & 1 & -l/2 \\ -1 & 1 & -l/2 + L/2 \end{pmatrix}$ 2. $M = \begin{pmatrix} -1 & 1 & l/2 + L/2 \\ -1 & 1 & l/2 \\ 1 & 1 & l/2 + L/2 \\ 1 & 1 & -l/2 + L/2 \\ 1 & 1 & -l/2 \\ -1 & 1 & -l/2 + L/2 \end{pmatrix}$

Рисунок 9 – Кинематические схемы М-робота

Остальные вариантов аналогичны рассмотренным. В каждом случае несложно вычислить псевдообратные матрицы для решения прямой кинематической задачи. Заметим, что наиболее интересными являются рассмотренные варианты 1 и 2 в силу того, что они не сводятся к четырехколесным роботам. Для них ниже приведены псевдообратные матрицы $M_i^+, i = 1,2$, где индекс обозначает номер рассматриваемого варианта:

$$M_1^+ = \begin{pmatrix} \frac{2l^2 + lL + 2L^2}{4(4l^2 + 3L^2)} & -\frac{2l^2 + L^2}{2(4l^2 + 3L^2)} & \frac{2l^2 - lL + 2L^2}{4(4l^2 + 3L^2)} & -\frac{2l^2 - lL + 2L^2}{4(4l^2 + 3L^2)} & \frac{2l^2 + L^2}{2(4l^2 + 3L^2)} & -\frac{2l^2 + lL + 2L^2}{4(4l^2 + 3L^2)} \\ \frac{1}{6} & \frac{1}{6} & \frac{1}{6} & \frac{1}{6} & \frac{1}{6} & \frac{1}{6} \\ \frac{2l - 3L}{2(4l^2 + 3L^2)} & \frac{2l}{4l^2 + 3L^2} & \frac{2l + 3L}{2(4l^2 + 3L^2)} & -\frac{2l + 3L}{2(4l^2 + 3L^2)} & -\frac{2l}{4l^2 + 3L^2} & -\frac{2l - 3L}{2(4l^2 + 3L^2)} \end{pmatrix}$$

$$M_2^+ = \begin{pmatrix} \frac{-6l^2 + lL - 2L^2}{12(4l^2 + L^2)} & \frac{-3l^2 - lL - L^2}{6(4l^2 + L^2)} & \frac{12l^2 + lL + 2L^2}{12(4l^2 + L^2)} & \frac{6l^2 + lL + 2L^2}{12(4l^2 + L^2)} & \frac{3l^2 - lL + L^2}{6(4l^2 + L^2)} & \frac{-12l^2 + lL - 2L^2}{12(4l^2 + L^2)} \\ \frac{2l^2 - lL}{3(4l^2 + L^2)} & \frac{4l^2 - 2lL + 3L^2}{6(4l^2 + L^2)} & \frac{2l^2 - 2lL}{3(4l^2 + L^2)} & \frac{2l^2 + lL}{3(4l^2 + L^2)} & \frac{4l^2 + 2lL + 3L^2}{6(4l^2 + L^2)} & \frac{2l^2 + 2lL}{3(4l^2 + L^2)} \\ \frac{2l + L}{2(4l^2 + L^2)} & \frac{l - L}{4l^2 + L^2} & \frac{4l + L}{2(4l^2 + L^2)} & \frac{-2l + L}{2(4l^2 + L^2)} & \frac{-l - L}{4l^2 + L^2} & \frac{-4l + L}{2(4l^2 + L^2)} \end{pmatrix}$$

Заметим, именно эти варианты реализованы на М-роботе.

На этих двух вариантах рассмотрим задачу о движении робота вдоль заданной траектории. Траекторию можно выбирать любую, записывать ее удобно в параметрическом виде. В этой работе рассматривается перемещение вдоль тестовой кривой - эпитрохоиды (кривая класса эпициклоид):

$$\begin{cases} \xi_1 = (R_1 + R_2)\cos\theta - d\cos\left(\dfrac{R_1 + R_2}{R_2}\theta\right), \\ \xi_2 = (R_1 + R_2)\sin\theta - d\sin\left(\dfrac{R_1 + R_2}{R_2}\theta\right), \\ \theta = \lambda t \end{cases} \quad (2)$$

которая задана в некоторой системе координат $O\xi_1\xi_2$, R_1, R_2, d, λ – параметры эпитрохоиды. Эта кривая показана на рис.10.

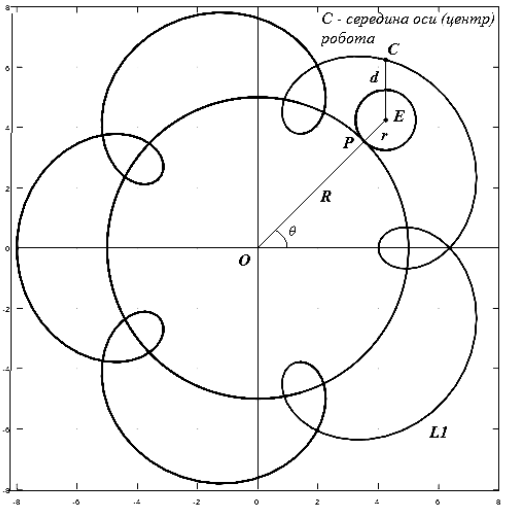


Рисунок 10 – Эпитрохоида

Поступательное движение робота вдоль траектории. Рассмотрим движение робота вдоль эпитрохоиды при условии, что корпус робота не может вращаться вокруг своей оси O_1z. Тогда $\omega = 0$. Будем считать, центр робота уже находится в какой-то точке траектории, а его ось O_1x находится под некоторым углом β к оси $O\xi_1$ и, согласно постановке задачи, должен его сохранять. Матрица перехода от системы O_1xy к системе $O\xi_1\xi_2$ – это матрица поворота $\begin{pmatrix} \cos\beta & \sin\beta \\ -\sin\beta & \cos\beta \end{pmatrix}$. Таким образом, угловые скорости колес выражаются следующим образом:

$$\begin{pmatrix} \dot{q}_1 \\ \vdots \\ \dot{q}_6 \end{pmatrix} = -\frac{1}{r} M \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ 0 \end{pmatrix} = -\frac{1}{r} M \begin{pmatrix} \dot{\xi}_1\cos\beta + \dot{\xi}_2\sin\beta \\ -\dot{\xi}_1\sin\beta + \dot{\xi}_2\cos\beta \\ 0 \end{pmatrix}$$

Для варианта 1 расстановки колес угловые скорости колес имеют вид:

$\dot{q}_1 = \dot{q}_3 = \dot{q}_5 = \omega_1, \dot{q}_2 = \dot{q}_4 = \dot{q}_6 = \omega_2$, где

$$\omega_1 = -\frac{\lambda(R_1 + R_2)}{r}\left((\sin\beta - \cos\beta)\left(\sin\theta - \frac{d}{R_2}\sin\frac{R_1 + R_2}{R_2}\theta\right) + (\cos\beta + \sin\beta)\left(\cos\theta - \frac{d}{R_2}\cos\frac{R_1 + R_2}{R_2}\theta\right)\right),$$

$$\omega_2 = -\frac{\lambda(R_1 + R_2)}{r}\left((\sin\beta + \cos\beta)\left(\sin\theta - \frac{d}{R_2}\sin\frac{R_1 + R_2}{R_2}\theta\right) + (\cos\beta - \sin\beta)\left(\cos\theta - \frac{d}{R_2}\cos\frac{R_1 + R_2}{R_2}\theta\right)\right).$$

Для варианта 2 расстановки колес угловые скорости колес выражаются теми же комбинациями, отличие только в номерах колес:

$$\dot{q}_3 = \dot{q}_4 = \dot{q}_5 = \omega_1,\ \dot{q}_1 = \dot{q}_2 = \dot{q}_6 = \omega_2.$$

Движение робота по касательной к траектории. Рассмотрим теперь движение робота вдоль эпитрохоиды при условии, что в каждый момент времени ось O_1x робота совпадает с касательной к траектории. Тогда $\omega = kv$, где k – кривизна траектории. Из (2) нетрудно получить выражение кривизны для эпитрохоиды:

$$k = \frac{\frac{(R_1+R_2)d^2+R_2{}^3}{R_2{}^3} - \frac{(R_1+2R_2)d}{R_2{}^2}\cos\left(\frac{R_1}{R_2}\theta\right)}{(R_1+R_2)\left(\frac{d^2+R_2{}^2}{R_2{}^2} - \frac{2d}{R_2}\cos\left(\frac{R_1}{R_2}\theta\right)\right)^{3/2}}.$$

Предполагаем, что в начальный момент корпус робота уже расположен так, что ось O_1x и касательная к графику траектории совпадают. Тогда угловые скорости колес выражаются следующим образом:

$$\begin{pmatrix}\dot q_1\\ \vdots \\ \dot q_6\end{pmatrix} = -\frac{1}{r}M\begin{pmatrix}v_x\\ v_y\\ \omega\end{pmatrix} = -\frac{1}{r}M\begin{pmatrix}\dot\xi_1\\ \dot\xi_2\\ k\sqrt{\dot\xi_1{}^2+\dot\xi_2{}^2}\end{pmatrix}$$

Для варианта 1 расстановки колес угловые скорости колес после преобразований имеют вид:

$$\dot q_1 = -\frac{\lambda}{r}\left(v_1 + (l/2 - L/2)\omega_k\right),\ \ \dot q_2 = -\frac{\lambda}{r}\left(v_2 + l/2\cdot\omega_k\right),\ \ \dot q_3 = -\frac{\lambda}{r}\left(v_1 + (l/2 + L/2)\omega_k\right),$$

$$\dot q_4 = -\frac{\lambda}{r}\left(v_2 - (l/2 + L/2)\omega_k\right),\ \ \dot q_5 = -\frac{\lambda}{r}\left(v_1 - l/2\cdot\omega_k\right),\ \ \dot q_6 = -\frac{\lambda}{r}\left(v_2 - (l/2 - L/2)\omega_k\right).$$

где

$$\omega_k = \frac{(R_1+R_2)d^2+R_2{}^3 - (R_1+2R_2)R_2 d\cos\left(\frac{R_1}{R_2}\theta\right)}{\left(d^2+R_2{}^2\right)R_2 - 2dR_2{}^2\cos\left(\frac{R_1}{R_2}\theta\right)},$$

$$v_1 = \sqrt{2}(R_1+R_2)\left(\sin\left(\frac{\pi}{4}-\theta\right) - \frac{d}{R_2}\sin\left(\frac{\pi}{4} - \frac{R_1+R_2}{R_2}\theta\right)\right),$$

$$v_2 = \sqrt{2}(R_1+R_2)\left(\cos\left(\frac{\pi}{4}-\theta\right) - \frac{d}{R_2}\cos\left(\frac{\pi}{4} - \frac{R_1+R_2}{R_2}\theta\right)\right).$$

Для варианта 2 расстановки колес угловые скорости колес в тех же обозначениях имеют вид:

$$\dot q_1 = -\frac{\lambda}{r}\left(v_2 + (l/2 + L/2)\omega_k\right),\ \ \dot q_2 = -\frac{\lambda}{r}\left(v_2 + l/2\cdot\omega_k\right),\ \ \dot q_3 = -\frac{\lambda}{r}\left(v_1 + (l/2 + L/2)\omega_k\right),$$

$$\dot q_4 = -\frac{\lambda}{r}\left(v_1 - (l/2 - L/2)\omega_k\right),\ \ \dot q_5 = -\frac{\lambda}{r}\left(v_1 - l/2\cdot\omega_k\right),\ \ \dot q_6 = -\frac{\lambda}{r}\left(v_2 - (l/2 - L/2)\omega_k\right).$$

В работе приведены явные формулы для угловых скоростей колес шестиколесного меканум-робота для движения по эпитрохоиде. Тем самым синтезируется программное движение робота по этой траектории.

По аналогии с рассмотренной траекторией можно построить движение робота по любой другой заданной кривой. Эксперименты по моделированию подтвердили работоспособность системы.

Эксперименты

С М-роботом проведены серии натурных экспериментов. В этих экспериментах робот испытывался на различных траекториях, двигался по "змейке" (синусоиде), так называемой "квадратной синусоиде", обходил препятствия по разным обходным маршрутам, за счет упругой подвески проходил неровности на полу (преодолевал препятствия типа порогов), испытывался на

задачах совместного манипулирования предметами и омни-движения. В последних сериях были проведены эксперименты, в которых робот собирал предметы в лаборатории и складывал их в ящик лабораторного стола.

Ниже на рис.11 приведена кинограмма в 7 кадров из видеофильма об одном из экспериментов по манипулированию предметами в лаборатории.

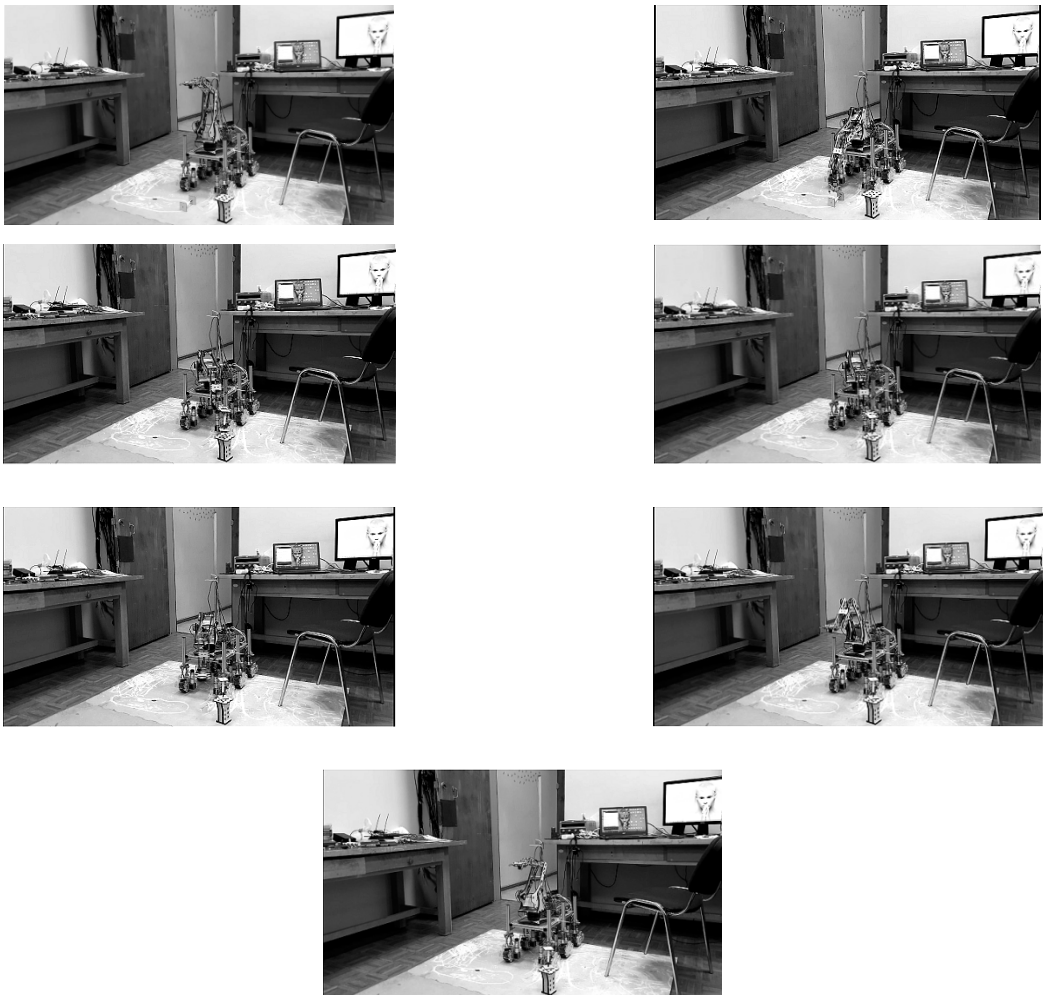


Рисунок 11 – Кинограмма натурного эксперимента

Во всех экспериментах робот показал надежное четкое функционирование. Была показана достаточная точность всех операций. Тем самым подтвердились выбранные решения по синтезу кинематически избыточной системы с значительной подвижностью.

Заключение

Теоретические исследования, компьютерное и натурное моделирование подтвердили техническую реализуемость представленного мобильного манипулятора. Функциональные качества робота оценены как достаточно эффективные.

Дальнейшие исследования предполагается вести в направлении оснащения созданной машины развитой сенсорикой, прежде всего зрением и дальномерной системой. Последнюю предполагается использовать для обнаружения препятствий на пути робота, соответствующая подсистема уже создана [11]. Тем самым планируется создание активного автономного робота.

1. Siciliano B., Khatib O., Springer handbook of robotics. Springer Science & Business Media, 2008.
2. Ilon B. Wheels for a course stable selfpropelling vehicle movable in any desired direction on the ground or some other base. Patent USA, 3876255, 1974.
3. L. Lin and H. Shih. Modeling and Adaptive Control of an Omni-Mecanum-Wheeled Robot. Intelligent Control and Automation, Vol. 4 No. 2, 2013, pp. 166-179.

4. Hamid Taheri, Bing Qiao and Nurallah Ghaeminezhad. Kinematic Model of a Four Mecanum Wheeled Mobile Robot. International Journal of Computer Applications 113(3):6-9, March 2015
5. Gfrerrer, A. Geometry and kinematics of the Mecanum wheel. Comput. Aided Geom. Design 25 (2008), no. 9, 784-791.
6. KUKA Roboter GmbH KUKA OMNIMOVE [Электронныйресурс] — Режим доступа: http://www.kuka-omnimove.com/en/
7. Е.Ю.Баранова, В.Е.Павловский. Кинематика шестиколесного меканум-робота. // Известия ВолгГТУ, серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах». - Волгоград, 2015. - № 13 (177). - с. 147-152.
8. Е.Ю.Колесниченко, В.Е.Павловский. Явный синтез управления движением колесного меканум-робота по криволинейной траектории. // Тр. Международной научно-технической конференции "Экстремальная робототехника" (ЭР-2016), 24-25 ноября 2016 г., Санкт-Петербург, с.171-176. Изд-во: СПб, ГНЦ ЦНИИ РТК – ООО "АП4Принт".
9. E.Yu.Kolesnichenko, V.E.Pavlovsky. Explicit Synthesis of Motion Control of Wheeled Mecanum-Robot Along the Curved Trajectory. // Proceedings of Intl. Scientific and Technological Conference "Extreme Robotics" (ER-2016), 24-25 November 2016, Saint-Petersburg, Russia, pp.167-171, Publ.: Saint-Petersburg, Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics (RTC) – "AP4Print".
10. Е.Ю.Колесниченко, В.Е.Павловский. Особенности управления движением меканум-робота по криволинейным траекториям. // Робототехника и техническая кибернетика. СПб, ГНЦ ЦНИИ РТК, №2(11), 2016 г. с. 62-69.
11. В.Е.Павловский. Эвристический алгоритм обнаружения изолированных препятствий мобильным роботом по дальномерным данным. // ИИиПР (Искусственный интеллект и принятие решений), №4, 2016 г. с.92-104.

E.S. Briskin, K.Yu. Lepetukhin, A.V. Maloletov, V.A. Serov, A.P. Kirillov

ON THE MOTION CONTROL OF A ROBOTIC MULTI-SECTION CENTER-PIVOT IRRIGATION MACHINE FOR PROCESSING NON-CIRCULAR FIELDS

Volgograd State Technical University, Volgograd
dtm@vstu.ru

Abstract

The study considers a method for controlling the movement of towers of a center-pivot irrigation machine to ensure processing of a non-circular field. The method can be implemented on standard towers of irrigation machine with a slight modification of their design. A dynamic model of the motion of a multi-section irrigation machine is developed. Dynamic effects of self-alignment and self-orientation of movable towers are considered. Motion control laws for processing oval shaped fields are obtained. The expediency of using such machines is shown on the example of a real field

Key words: multi-section center-pivot irrigation machine, irrigation, self-orientation, self-alignment, optimal control, agricultural robotics.

Е.С. Брискин, К.Ю. Лепетухин, А.В. Малолетов, В.А. Серов, А.П. Кириллов

ОБ УПРАВЛЕНИИ ДВИЖЕНИЕМ РОБОТИЗИРОВАННОЙ МНОГОЗВЕННОЙ ДОЖДЕВАЛЬНОЙ МАШИНЫ ДЛЯ ОРОШЕНИЯ ПОЛЕЙ НЕКРУГЛОЙ ФОРМЫ

Волгоградский государственный технический университет, Волгоград
dtm@vstu.ru

Аннотация

В исследовании рассматривается способ управления движением подвижных опор дождевальной машины кругового действия, обеспечивающий обработку поля некруглой формы. Способ может быть реализован на стандартных опорах дождевальных машин с незначительным изменением их конструкции. Разработана динамическая модель движения многосекционной дождевальной машины.

Рассмотрены динамические эффекты самоустановки и самоориентации подвижных опор. Получены законы движения опор, обеспечивающие обработку поля овальной формы. Показана целесообразность применения таких машин на примере реального поля.

Ключевые слова: многосекционные дождевальные машины кругового действия, орошение, самоориентация, оптимальное управление, сельскохозяйственная робототехника.

Введение

Современные дождевальные машины кругового действия представляют собой сложные робототехнические системы, позволяющие регулировать производительность и качество полива на каждом участке обрабатываемого поля в зависимости от рельефа местности, условий окружающей среды и агротехнических особенностей орошаемых культур [1, 2, 3, 4]. Ирригационная система размещается на несущей ферме, которая собирается из нескольких шарнирно соединённых между собой секций. Каждая секция кроме первой одним концом опирается на предыдущую секцию, а второй конец поддерживается подвижной опорой, в качестве которой стандартно выступает двухколёсная тележка. Первая секция закрепляется в центральной части поля, куда осуществляется подвод воды и электроэнергии. В простейшем случае система управления движением опорных тележек контролирует прямолинейное расположение секций, обеспечивая тем самым обработку круглого поля. Между круглыми полями остаются большие участки необрабатываемой земли, что существенно снижает эффективность такого способа орошения. На рисунке 1 показана полученная в сервисе Google Maps космическая фотография полей, обрабатываемых такими машинами.

Способы устранения этого недостатка базируются на идее управления движением опорных тележек машины так, чтобы машина охватывала площадь, отличную по форме от круга. В более простом варианте одна или несколько дополнительных концевых секций поворачиваются относительно основной части машины [5, 6, 7], причём остальные тележки обычно затормаживаются на это время. В общем случае могут быть задействованы все секции машины, а их взаимный поворот происходить без остановок [8]. Для этого, конструкция опор должна обеспечивать возможность их движения в произвольном направлении.

Разработаны тележки для дождевальных машин (рисунок 2) со сдвоенными лямбдаобразными четырехзвенными механизмами шагания [9, 10]. Такие движители обеспечивают по сравнению с колесными меньшее давление на грунт, что снижает колееобразование [11] и энергозатраты [12, 13]. Однако тележки с такими движителями не имеют преимущества по сравнению с колёсными тележками по показателям маневренности.

Рисунок 1 – Космическая фотография круглых полей. Участки круглой формы – орошаемые с помощью дождевальных машин поля, участки между кругами – необрабатываемые

a b

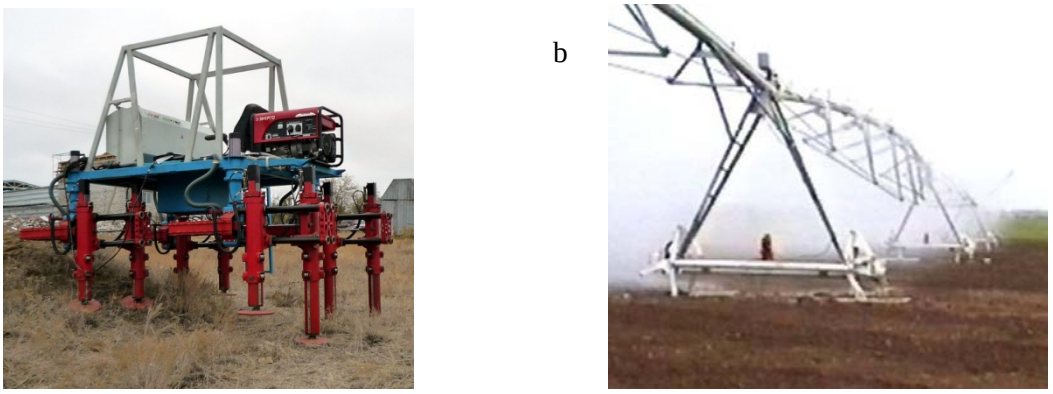


Рисунок 2 – Дождевальная машина с шагающими опорами (a) и шагающий робот «Ортоног» (b)

Применение более совершенных шагающих движителей, например таких, как в шагающей машине «Ортоног» (рисунок 2) [14] обеспечивает практически «идеальную» маневренность и позволяет формировать из таких машин различные структуры, в том числе соединяя их в линию подобно дождевальной машине [15, 16].

Постановка проблемы

Ранее авторами работы были решены задачи оптимального управления взаимным расположением секций дождевальной машины по критерию энергозатрат на движение при обработке поля произвольной формы, получены законы управления движением опорных тележек при перемещении периферийной тележки по кромке поля [8, 17, 18]. Однако полученные законы движения включают в себя участки траекторий, на которых опорные тележки должны менять направление движения, перемещаться вбок или назад.

Принципиально обеспечить произвольное перемещение опорной тележки можно следующими способами.

– Использовать опорные тележки с шагающими движителями, которые имеют достаточно большое число управляемых степеней свободы, чтобы обеспечить «идеальную» маневренность. Например, для шагающих машин типа «Ортоног» это возможно, а для шагающих движителей, использованных в подвижной опоре дождевальной машины «Кубань» - нет.

– Использовать поворотные колёса, способные произвольно ориентироваться относительно опорной тележки. Этот вариант является практически целесообразным, а основной его недостаток — дополнительный привод поворота — не является существенным.

– Использовать роликонесущие омни или меканум колёса. Однако такие колёса хорошо работают на чистой и ровной поверхности, но их применение на реальном грунте представляется малоэффективным.

Указанные способы требуют существенного изменения конструкции подвижных опор дождевальной машины. В то же время существует возможность управлять взаимным расположением секций машины без существенного изменения конструкции опорных тележек с единственным приводным двигателем на каждой тележке.

Очевидно, что при вращении многосекционной дождевальной машины как твёрдого тела вокруг центральной опоры, подвижные опоры описывают концентрические окружности, и скорость каждой опоры пропорциональна расстоянию от опоры до центра (рис.3). При изменении скоростей движения опорных тележек, они будут стремиться занять такое положение, чтобы расстояния от них до центра поля было пропорционально их линейным скоростям. Следовательно, управляя скоростями движения тележек, можно добиться требуемого изменения взаимного расположения секций. Такое движение не является кинематически точным и требует изучения динамики рассматриваемой системы.

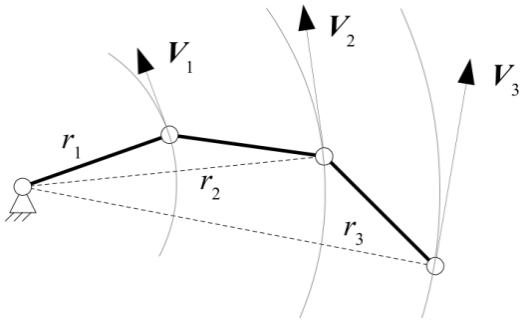


Рисунок 3 – Схема самоустановки секций дождевальной машины

Таким образом, ставится задача исследования и целенаправленного использования динамических эффектов, возникающих в процессе движения многозвенной дождевальной машины кругового действия при управлении скоростями подвижных опор.

Эффект самоориентации

При рассматриваемом движении ось каждой опорной тележки должна ориентироваться по касательной к траектории движения. Для установившегося движения по окружности, ось тележки ориентирована перпендикулярно линии, соединяющей центр окружности и колесо тележки. Однако в связи с тем, что размеры тележки пренебрежимо малы по сравнению с расстояниями до оси вращения, можно считать, что ось тележки ориентирована перпендикулярно линии, соединяющей центр поля и узловую точку секции.

При этом, опорные тележки должны располагаться сзади относительно секции. На схеме (рис.4) показано, что при отклонении опорной тележки от перпендикуляра к линии, соединяющей ось вращения и тележку, возникает боковая сила сопротивления качению колеса, восстанавливающая перпендикулярное положение тележки в случае, когда тележка находится сзади (рис 4.а и 4.б), и способствующая увеличению отклонения тележки от перпендикуляра в противном случае (рис. 4.в и 4.г). Для наглядности на рисунке 4 тележки показаны в увеличенном масштабе.

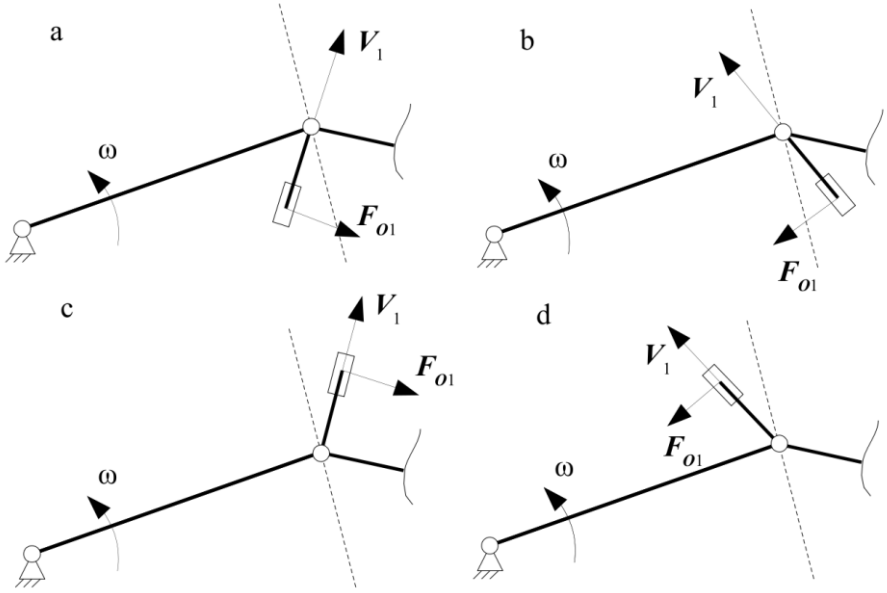


Рисунок 4 – Схема самоориентации опорных тележек:
a и b – движение устойчиво, c и d – движение неустойчиво

Указанные теоретические соображения были проверены экспериментально на лабораторной модели двухсекционной машины (рис. 5). На рисунке 5.а показана ситуация, к которой приводит попытка установить опорные тележки впереди машины (вращение аппарата вокруг центральной опоры против часовой стрелки): тележки разворачиваются относительно секций и движение секций прекращается при 100 % буксовании колёс по опорной поверхности. При включении двигателей в тележках в противоположном направлении (рис. 5.b – вращение аппарата по часовой стрелке), тележки

сохраняют свою ориентацию относительно секций, а сами секции поворачиваются относительно друг друга так, что расстояния от центральной опоры до тележек пропорциональны скоростям вращения колёс.

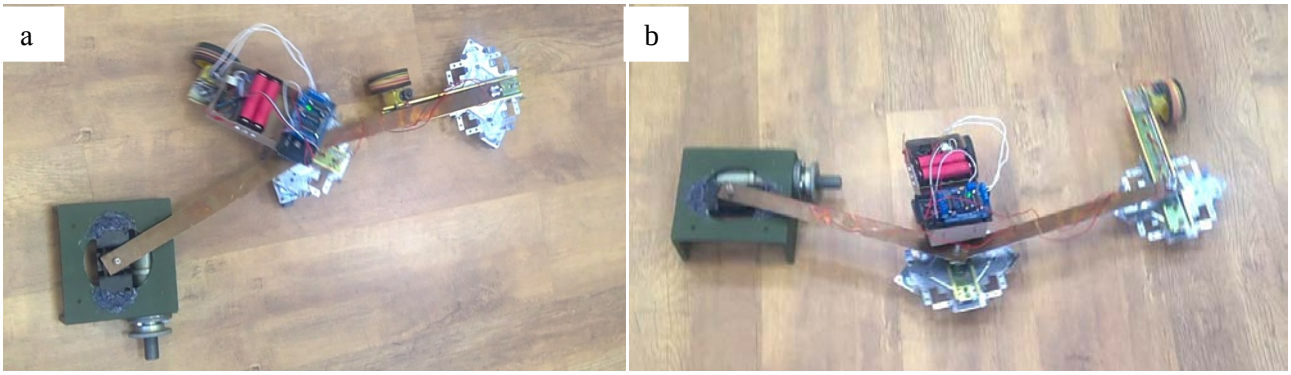


Рисунок 5 – Лабораторная модель двухсекционной машины

Численное моделирование динамики движения

Дождевальная машина рассматривается как система твёрдых тел, соединённых друг с другом шарнирами. Эта система может быть разбита на N подсистем, каждая из которых содержит два твёрдых тела — секцию и тележку (рис. 6).

С каждым из этих твёрдых тел связывается подвижная система координат с началом отсчёта в центре масс соответствующего тела. В качестве независимых обобщённых координат выбираются координаты центра масс в неподвижной системе отсчёта ξη и угол поворота тела φ.

Секция i взаимодействует с тележкой i в точке A_i. Обозначим силы взаимодействия: $\boldsymbol{P_i}$ – сила, с которой секция действует на тележку, $\boldsymbol{P^-_i}$ – сила, с которой тележка действует на секцию.

Секция i взаимодействует с секцией i-1 в точке A_i-1 и с секцией i+1 в точке A_i. Обозначим через $\boldsymbol{R_i}$ силу, с которой i-1 секция действует на i секцию, а через $\boldsymbol{R^-_{i+1}}$ — силу, с которой i+1 секция действует на i секцию. Для i=1 точка A_0 - это точка взаимодействия с опорой. Для i=N следующая секция отсутствует, поэтому сила $\boldsymbol{R^-_{N+1}} = 0$.

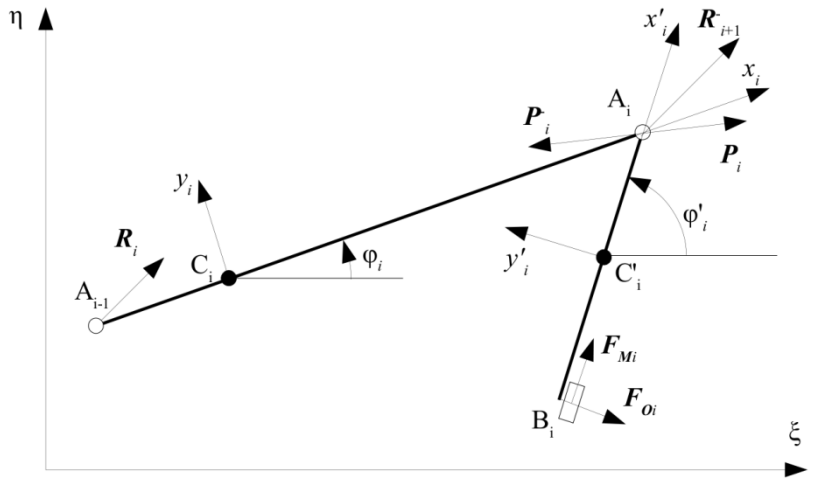


Рисунок 6 – Расчётная схема

Положение точек A_i и A_{i-1} задаются в подвижной системе отсчёта, связанной с i секцией. В общем случае точки крепления тележек к секциям и секций друг к другу могут быть различными, а их координаты в подвижных системах отсчёта могут принимать произвольные значения. Однако в известных конструкциях дождевальных машин точки крепления секций и тележек практически совпадают, а их координаты по осям y_i равны нулю.

Тогда, с учётом соотношений

$$\boldsymbol{P_i} = -\boldsymbol{P^-_i}\ , \quad \boldsymbol{R_i} = -\boldsymbol{R^-_i} \tag{1}$$

дифференциальные уравнения движения подсистемы могут быть записаны в виде:

$$
\begin{aligned}
&m_i \ddot{\xi}_i = R_{i,\xi} - R_{i+1,\xi} - P_{i,\xi}\\
&m_i \ddot{\eta}_i = R_{i,\eta} - R_{i+1,\eta} - P_{i,\eta}\\
&J_i \ddot{\varphi}_i = -R_{i,\xi} x_{i,i-1} \sin(\varphi_i) + R_{i,\eta} x_{i,i-1} \cos(\varphi_i) + R_{i+1,\xi} x_{i,i} \sin(\varphi_i)\\
&\qquad - R_{i+1,\eta} x_{i,i} \cos(\varphi_i) + P_{i,\xi} x_{i,i} \sin(\varphi_i) - P_{i,\eta} x_{i,i} \cos(\varphi_i)\\
&m'_i \ddot{\xi}'_i = P_{i,\xi} + F_{Oi} \sin(\varphi'_i) + F_{Mi} \cos(\varphi'_i)\\
&m'_i \ddot{\eta}'_i = P_{i,\eta} - F_{Oi} \cos(\varphi'_i) + F_{Mi} \sin(\varphi'_i)\\
&J'_i \ddot{\varphi}'_i = -P_{i,\xi} x'_i \sin(\varphi'_i) + P_{i,\eta} x'_i \cos(\varphi'_i) - F_{Mi} y'_{Bi} - F_{Oi} x'_{Bi}
\end{aligned}
\qquad (2)
$$

где m_i, m'_i – массы i-ой секции и тележки; J_i, J'_i – моменты инерции i-ой секции и тележки; ξ_i, η_i, φ_i, ξ'_i, η'_i, φ'_i – координаты центра масс и углы поворота i-ой секции и тележки; x_{ij} – координата точки A_j в подвижной системе координат, связанной с i-ой секцией, x'_i – координата точки A_j в системе координат ассоциированной с i-ой тележкой, x'_{Bi} , y'_{Bi} – координаты центра i-го колеса B_i в системе координат связанной с i-ой тележкой, F_{Mi}, F_{Oi} – продольные и поперечные силы взаимодействия i-ого колеса с опорной поверхностью.

Для определения сил взаимодействия колеса с грунтом используется линейная зависимость сил от относительных величин скольжения опорной точки колеса по опорной поверхности:

$$
F_{Mi} = -k_M \frac{V_{Bi,x} - V_i}{V_i}, \quad F_{Oi} = -k_O \frac{V_{Bi,y}}{V_i}
\qquad (3)
$$

здесь V_i – скорость центра колеса, которую он имел бы при качении без проскальзывания; $V_{Bi,x}$, $V_{Bi,y}$ – проекции реальной скорости центра колеса B_i на продольную и поперечную оси; k_M, k_O – коэффициенты, зависящие от условий сцепления колеса с опорной поверхностью в продольном и поперечном направлении и от нормальной реакции опорной поверхности на колесо. Такая модель не может быть использована при затормаживании колеса или при экстремально больших значениях относительного скольжения. Однако она даёт приемлемые результаты в случае относительно медленного, но не прерывающегося движения, которое наблюдается в дождевальных машинах. Для оценки значений коэффициентов сцепления для численного моделирования использовались данные известные из теории колёсных машин [19] и экспериментальных исследований [20].

Для определения сил взаимодействия между телами системы записываются уравнения:

$$
\begin{aligned}
&D_{i,\xi} = (\xi_i + x_{i,i-1} \cos(\varphi_i)) - (\xi_{i-1} + x_{i-1,i-1} \cos(\varphi_{i-1}))\\
&D_{i,\eta} = (\eta_i + x_{i,i-1} \sin(\varphi_i)) - (\eta_{i-1} + x_{i-1,i-1} \sin(\varphi_{i-1}))\\
&D'_{i,\xi} = (\xi_i + x_{i,i} \cos(\varphi_i)) - (\xi'_i + x'_i \cos(\varphi'_i))\\
&D'_{i,\eta} = (\eta_i + x_{i,i} \sin(\varphi_i)) - (\eta'_i + x'_i \sin(\varphi'_i))
\end{aligned}
\qquad (4)
$$

которые представляют собой алгебраические уравнения и в общую систему дифференциальных уравнений включаются в виде:

$$
\begin{aligned}
&\ddot{D}_{i,\xi} + 2a\dot{D}_{i,\xi} + b^2 D_{i,\xi} = 0, \quad \ddot{D}_{i,\eta} + 2a\dot{D}_{i,\eta} + b^2 D_{i,\eta} = 0\\
&\ddot{D}'_{i,\xi} + 2a\dot{D}'_{i,\xi} + b^2 D'_{i,\xi} = 0, \quad \ddot{D}'_{i,\eta} + 2a\dot{D}'_{i,\eta} + b^2 D'_{i,\eta} = 0
\end{aligned}
\qquad (5)
$$

где a и b — постоянные коэффициенты, значения которых подбираются экспериментально для обеспечения устойчивости численного решения [21].

Обсуждение результатов

В качестве примера, на рисунке 7 показаны некоторые результаты математического моделирования движения дождевальной машины кругового действия, состоящей из пяти секций. Тонкими линиями показаны траектории движения узловых точек машины, а жирными линиями – секции машины в одном или нескольких положениях на поле. Во всех случаях в начальный момент времени секции машины вытянуты в прямую линию, занимающую горизонтальное положение.

На рисунке 7.а скорости тележек заданы так, чтобы каждая следующая тележка от центра отставала в своём движении от предыдущей. Эффект самоустановки машины в этом случае наблюдается – секции машины выстраиваются в характерную дугообразную форму. Однако процесс самоустановки происходит недопустимо медленно: для установки расстояний от центра до опорных тележек пропорциональных их скоростям требуется более полного оборота машины вокруг центра.

В случае, если требование отставания тележек друг от друга нарушается, эффекта самоустановки не наблюдается (рис. 7.b): периферийные тележки обгоняют центральные и секции машины сталкиваются друг с другом.

Для убыстрения процессов установки необходимо менять скорость опорных тележек с опережением относительно скоростей, соответствующих желаемым траекториям. А во избежание столкновений секций необходимо компенсировать слишком быстрое движение тележек на некоторых участках более медленным на следующих этапах движения. Руководствуясь этими принципами были получены законы движения тележек, обеспечивающие обработку поля овальной формы (рис. 7.c).

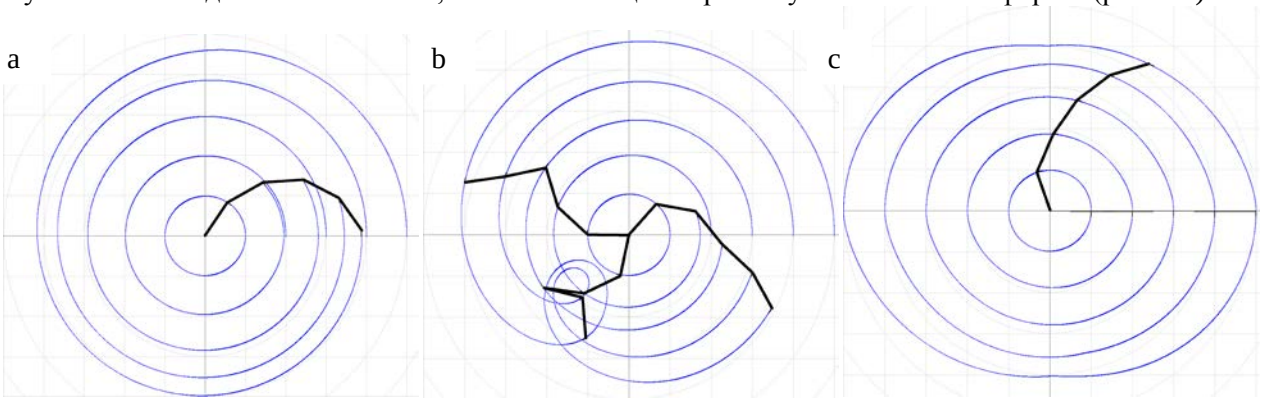


Рисунок 7 – Примеры математического моделирования движения машины из пяти секций

Рисунок 8 – Схемы возможного расположения круглых и овальных полей

Применение машин, обрабатывающих поля овальной формы может быть эффективным для реальных участков местности. В качестве примера на рисунке 8 показан план участка в районе Карповского водохранилища Волгоградской области, который в 2017 году обрабатывался 8 дождевальными машинами кругового действия. Добавление 4 аналогичных машин (рис. 8.a) позволило бы обрабатывать около 60 % от общей площади участка, задействовав в общей сложности 112 секций. А применение самоустанавливающихся тележек (рис. 8.b) позволило бы за счёт увеличения количества секций до 157 при том же количестве машин, увеличить обрабатываемую площадь до 70 %.

Заключение

Подтверждено явление самоустановки секций многозвенной машины в зависимости от соотношения скоростей движения опорных тележек. Установлено существование границ соотношений скоростей при которых явление самоустановки протекает устойчиво и неустойчиво.

Подтверждено явление самоориентации опорных тележек при их расположении сзади относительно секций.

Разработанный метод позволяет применять дождевальные машины кругового действия для обработки полей некруглой формы без существенного изменения конструкции опорных тележек.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 17-01-00675 а, 18-38-00946 мол_а).

1. Effect of the start–stop cycle of center-pivot towers on irrigation performance: Experiments and simulations [Electronic resourse]/ Ouazaaa, B. Latorrea, J. Burguetea, A. Serretab, E. Playána, R. Salvadora,P. Paniaguaa, N. Zapata – 2015
2. Autonomous precision agriculture through integration of wireless underground sensor networks with center pivot irrigation systems [Electronic resourse]/ Xin Dong, Mehmet C. Vuran, Suat Irmak – 2013
3. DEPIVOT: A model for center-pivot design and evaluation [Electronic resourse]/ M.I. Valín, M.R. Cameira, P.R. Teodoro, L.S. Pereira – 2012
4. Б.П.Фокин, А.К.Носов, Современные проблемы применения многоопорных дождевальных машин – Научное издание. – Ставрополь, 2011. – 80 с.
5. Кузнецов, П.И. К вопросу модернизации многоопорных дождевальных машин кругового действия / Кузнецов П.И. // Природообустройство. - 2011. - № 4. - С. 72-75.
6. Pat. US6085999 Corner Irrigation System / Jerry D. Gerdes, Dale A. Christensen. Valmont Industries, Inc. – 2000.
7. Pat. US6726132 Corner Irrigation System Including an Ultra Wide Band (UWB) Guidance System / Craig S. Malsam. Valmont Industries, Inc. – 2004.
8. Малолетов, А.В. Управление движением опор дождевальной машины кругового действия при движении по полям сложной формы / А.В. Малолетов, К.Ю. Лепетухин // Известия ВолгГТУ. Сер. Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах. - Волгоград, 2015. - № 14 (178). - С. 143-147.
9. Пат. 2496304 РФ, МПК A01G25/09, B62D57/02. Самоходная шагающая тележка многоопорной дождевальной машины / В.В. Чернышев, Е.С. Брискин, А.В. Малолетов, И.П. Вершинина; ВолгГТУ. - 2013.
10. Пат. 2496305 РФ, МПК A01G25/09, B62D57/02. Самоходная шагающая тележка многоопорной многосекционной дождевальной машины / В.В. Чернышев, Е.С. Брискин, Н.Г. Шаронов, И.П. Вершинина; ВолгГТУ. - 2013.
11. Опыт разработки и испытаний шагающих опор дождевальной машины / Е.С. Брискин, В.В. Чернышев, В.В. Жога, А.В. Малолетов // Тракторы и сельхозмашины. - 2011. - № 9. - С. 27-31.
12. Брискин, Е.С. Концепция проектирования, динамика и управление движением шагающих машин. Ч. 2. Динамика движения шагающих машин серии "Восьминог" / Брискин Е.С., Чернышев В.В., Жога В.В., Малолетов А.В., Шаронов Н.Г., Фролова Н.Е. // Мехатроника, автоматизация, управление. - 2005. - № 6. - С. 19-26.
13. On Dynamics of Movement of Walking Machines with Gears on the Basis of Cycle Mechanisms / Briskin E.S., Chernyshev V.V., Maloletov A.V., Sherstobitov S.V. // Theory and Practice of Robots and Manipulators. ROMANSY 13: Proc. of the 13-th CISM-IFToMM Symposium / International Centre for Mechanical Sciences. - Wien; New York, 2000. - P. 313-322.
14. Об управлении движением шагающей машины со сдвоенными ортогонально-поворотными движителями / Е.С. Брискин, И.П. Вершинина, А.В. Малолетов, Н.Г. Шаронов // Известия РАН. Теория и системы управления. - 2014. - № 3. - С. 168-176.
15. Малолетов, А.В. Управление группой кинематически связанных шагающих машин / Малолетов А.В., Лепетухин К.Ю., Шаронов Н.Г., Брискин Е.С. // Экстремальная робототехника. - 2015. - № 1. - С. 315-320.
16. On Optimal Laws of Groups of Walking Robots Motion while Solving Formation Task / Eugene Briskin, Alexander Maloletov // Conference Proceedings of the ECCOMAS Thematic Conference on MULTIBODY DYNAMICS. - Prague 2017. P. 601-605.
17. Лепетухин, К.Ю. Об управлении роботизированной многоопорной дождевальной машиной кругового типа действия / К.Ю. Лепетухин, А.В. Малолетов // В книге: Десятая всероссийская мультиконференция по проблемам управления (МКПУ-2017). Материалы 10-й Всероссийской мультиконференции в 3-х томах. Ответственный редактор: И.А. Каляев. - 2017. - С. 93-95.
18. Лепетухин, К.Ю. Об оптимальном управлении взаимным расположением секций дождевальной машины кругового действия при обработке некруглых полей / К.Ю. Лепетухин, А.В. Малолетов, Е.С. Брискин // Мехатроника, автоматизация, управление. - 2017. - Т. 18, № 2. - С. 103-107.
19. Смирнов Г.А. Теория движения колёсных машин — М.: Машиностроение, 1990.—352 с.

20. А.И.Рязанцев, Н.Я.Кириленко, И.В.Малько. Улучшение тягово-сцепных свойств ходовых систем дождевальных машины кругового действия "Фрегат"/А.И.Рязанцев, Н.Я.Кириленко, И.В.Малько. Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А.Костычева - 2014 - С. 56-59.
21. Виттенбург Й Динамика систем твердых тел. - М.: Мир, 1980. - 296 с.

M.A. Nogin[1,2], A.L. Korotkov[1], A.V. Rogov[1], O.A. Shmakov[1], A.V. Lopota[1]

RTC PROVING GROUND FOR MOBILE ROBOTIC COMPLEXES

[1] Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics, Saint-Petersburg
[2]SPbPU, Saint Petersburg
m.nogin@rtc.ru, a.korotkov@rtc.ru, rogov@rtc.ru, shmakov@rtc.ru, alopota@rtc.ru

Abstract

Authors provide a brief analytical review of existing proving grounds for land vehicles and a comparative assessment of the obstacles that constitute them. Based on the above assessment of the existing proving grounds, as well as on the experience of developing mobile robots, the most revealing obstacles for the robotic complexes developed in the RTC are built on the territory of the institute. These obstacles fully reflect the specifics of the application areas of unmanned land vehicles with a mass of up to 1000 kg.

The paper describes the tests made on obstacles of local proving ground using the robotic complex developed in the RTC. These obstacles simulate the most common situation encountered during the operations of robotic complexes. The test results allow determining the most critical parameters of the developed complexes, which contributes to the adoption of optimal design solutions for a particular task.

Key words: mobile robotics complex, proving ground, typical test procedure, testing of robotic complexes.

М.А. Ногин[1,2], А.Л. Коротков[1], А.В. Рогов[1], О.А. Шмаков[1], А.В. Лопота[1]

ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ ПОЛИГОН ЦНИИ РТК ДЛЯ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

[1]ГНЦ РФ ЦНИИ РТК,
[2]СПбПУ, Санкт-Петербург
m.nogin@rtc.ru, a.korotkov@rtc.ru, rogov@rtc.ru, shmakov@rtc.ru, alopota@rtc.ru

Аннотация

В статье представлен краткий аналитический обзор существующих испытательных полигонов для наземных транспортных средств и проведена сравнительная оценка составляющих их препятствий. На основании приведенной оценки существующих испытательных полигонов и опыта разработки мобильных роботов, на базе ЦНИИ РТК построены препятствия, показательные для разрабатываемых в институте робототехнических комплексов. Данные препятствия в полной мере отражают специфику областей применения разрабатываемых беспилотных наземных транспортных средств массой до 1000 кг.

В статье описаны испытания, проведенные на препятствиях полигона, имитирующего наиболее распространенные ситуации, встречаемые при опытной эксплуатации с использованием разработанных в ЦНИИ РТК робототехнических комплексов. Результаты испытаний позволяют определить наиболее критичные параметры разрабатываемых комплексов, что способствует принятию оптимальных для той или иной задачи конструкционных решений.

Ключевые слова: мобильный робототехнический комплекс, испытательный полигон, типовая методика испытаний, испытание робототехнических комплексов.

Введение

В рамках разработки испытательного полигона ЦНИИ РТК выполнен аналитический обзор отечественных и зарубежных полигонов и стендовых баз для оценки функциональных возможностей

наземных транспортных средств (ТС) различных классов. В целом все рассмотренные испытательные полигоны и стендовые базы можно условно разделить на две категории: дорожные участки и препятствия.

Первая категория включает в себя уличные трассы различной формы – прямолинейные, с резкими поворотами, серпантины; и с различным типом дорожного полотна – асфальтированные, бетонные, гравийные, песчаные, глиняные (грунтовые), вымощенные булыжником («бельгийская мостовая»). Дорожные участки применяются для оценок скоростных характеристик, ускорения и торможения, маневрирования, проходимости в сыпучей и вязкой среде, устойчивости к вибрациям и определению «запаса хода» ТС.

Вторая категория имеет широкий ряд разнообразных препятствий, используемых для оценок управляемости, проходимости, курсовой устойчивости, герметичности ТС. Данная категория включает следующие типы препятствий: наклонные поверхности с углами наклона до 60°, лестничные марши, завалы, имитирующие городскую среду во время разрушений, туннели и лабиринты для оценки функционирования мобильных комплексов в условиях ограниченного пространства, водные преграды (бассейны), железнодорожные переезды, рвы, уступы, пороги, разнонаправленные прямые и наклонные рампы, V-образные овраги.

В табл. 1 приведены обобщенные данные по испытательным участкам и препятствиям, используемым для испытаний ТС. В заголовке таблицы цифрами обозначены следующие полигоны:

1 – центр тестирования и оценки сухопутных сил армии США в Абердине, штат Мэриленд [1];

2 – центр тестирования и оценки сухопутных сил армии США в Юме, штат Аризона [2];

3 – испытательный полигон ФКП «НИИ «Геодезия»» [3- 5];

4 – автополигон ФГУП «НАМИ» [6, 7];

5 – полигон для международных соревнований среди роботов RoboCup [8, 9];

6 – полигон для соревнований «Кубок РТК» [10].

Знаком «+» в таблице отмечено наличие данного препятствия или участка, в каком-либо виде на испытательном полигоне, знаком «–» – его отсутствие.

Таблица 1. Сводные данные по испытательным участкам и препятствиям

Наименование испытательного участка или препятствия	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
Асфальтированный участок	+	–	+	+	–	–
Гравийный участок	+	+	+	+	+	–
Бетонный участок	+	–	+	+	–	–
Песчаный участок	+	+	+	+	+	+
Глиняный (грунтовый) участок	+	+	+	+	–	–
Травяной участок	+	–	+	+	–	+
Участок «Бельгийская мостовая»	+	–	–	+	–	–
Наклонные поверхности	+	+	+	+	+	+
Лестничные марши	–	+	+	–	+	+

Завалы	+	+	+	–	–	+
Туннели	–	–	+	–	–	+
Лабиринты	–	–	+	–	+	+
Водные преграды	+	+	+	+	–	–
Ж/д переезды	–	–	+	–	–	–
Рвы	+	+	–	–	–	+
Уступы	+	+	–	–	+	+
Пороги	–	+	–	–	–	–
Рампы	+	+	+	–	+	+
Овраги	+	+	–	–	–	–

Среди дорожных участков наиболее распространены участки с гравийным покрытием, песчаным покрытием, грунтовым (глиняным) покрытием и с травяным покрытием. Наиболее распространенными препятствиями являются: наклонные поверхности, лестничные марши, завалы, водные преграды, уступы и рампы.

Стоит отметить, что испытания типа дорожные участки наиболее распространены на военных испытательных полигонах для проведения испытаний пилотируемой военной техники, в то время как испытания типа препятствия чаще встречаются на испытательных полигонах для мобильных робототехнических комплексов (МРК). Также у испытаний типа препятствия, если они рассчитаны для проведения испытаний ТС легких классов (массой до 1000 кг), есть преимущество перед испытаниями типа дорожные участки, заключающееся в их сравнительно меньших габаритных размерах. Оба этих фактора использованы при проектировании испытательного полигона ЦНИИ РТК и выборе разработанных испытаний. Расположение испытательного полигона в непосредственной близости к месту разработки испытуемых МРК дает значительное преимущество, т.к. во время преодоления препятствий испытуемые подвергаются критическим нагрузкам, вследствие чего велика вероятность отказа систем и необходимости в ремонте и доработке конструкции. Разрабатываемые в ЦНИИ РТК мобильные робототехнические комплексы наземного базирования преимущественно не превышают по массе 1000 кг, из чего следует отсутствие необходимости размещения на испытательном полигоне препятствий типа дорожные участки. Таким образом, испытательный полигон можно расположить на территории института.

Испытательный полигон ЦНИИ РТК [1]

Препятствия полигона ЦНИИ РТК предназначены для проведения пробеговых испытаний, определения энергетических и топливно-экономических характеристик, управляемости, тягово-сцепных свойств при преодолении препятствий в условиях воздействия природных климатических условий мобильными робототехническими комплексами массой до 1000 кг и оценки их конструктивных решений. Также в состав полигона входят препятствия, предназначенные для проведения исследований по взаимодействию с техногенной окружающей обстановкой, в том числе

[1] Заявка на полезную модель от 08.12.2017 № 2017143045.

проведение испытаний манипуляционных систем робототехнических комплексов. Для проведения этих испытаний разработаны следующие модули и препятствия.

1. Комплекс модулей наклонных поверхностей с различным грунтом (см. рис. 1).

Комплекс состоит из трех реконфигурируемых модулей, расположенных на площадке с асфальтовым покрытием. Под возможностью реконфигурации следует понимать замену наклонных поверхностей в модулях. Модули используются для оценки маневрирования на наклонных и горизонтальных поверхностях с рыхлым покрытием. В состав комплекса входят следующие модули:

– модуль с песчаным покрытием; габаритные размеры: 10 х 10 х 1,5 м; включает: наклоны 20º, 25º и 30º, эскарп с крутизной 60º, прямолинейный участок 3 х 3 м;

– модуль с гравийным покрытием; габаритные размеры: 8 х 8 х 1,5 м; включает: наклоны 20º, 30º и 40º, прямолинейный участок 3 х 3 м;

– модуль с глиняным покрытием (на рисунке не показан); габаритные размеры: 10 х 9,5 х 1,5 м; включает: наклоны 20º, 30º и 40º, эскарп с крутизной 45º, прямолинейный участок 3 х 3 м.

Рисунок 1 – Комплекс модулей наклонных поверхностей с различным грунтом

2. Модуль наклонных поверхностей и лестничных маршей с бетонным покрытием (см. рис. 2).

Модуль используется для оценки маневрирования на наклонных и горизонтальных поверхностях с твердым покрытием и для оценки преодоления лестниц. Модуль состоит из двух наклонных с углами наклона 20º и 30º, лестничного марша типа ЛМ по ГОСТ 9818-2015 и прямолинейного участка 3 х 3 м.

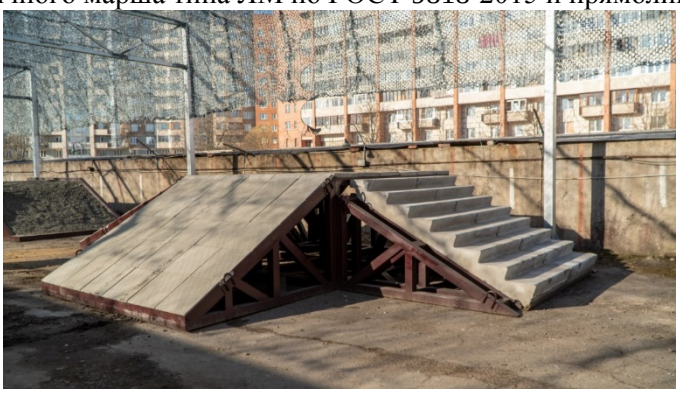


Рисунок 2 – Модуль наклонных поверхностей и лестничных маршей с бетонным покрытием

3. Модули элементов железной дороги (см. рис. 3).

Модули представляют собой участки железнодорожного полотна с бетонными и деревянными шпалами, уложенными на землю и на гравийную насыпь. Модули применяются для оценки возможности движения по различным конфигурациям железнодорожного полотна.

Рисунок 3 – Модули элементов железной дороги

4. Модуль поверхности, имитирующей рельеф сильнопересеченной местности (см. рис. 4).

Модуль представляет собой участок 6 х 3 м с реконфигурируемой сильнопересеченной местностью. Препятствия выполнены из стеновых бетонных блоков с возможностью изменения взаимного расположения блоков для воссоздания условий пересеченной местности, в том числе завалов.

Рисунок 4 – Модуль поверхности, имитирующей рельеф сильнопересеченной местности

5. Модуль бассейна (см. рис. 5).

Препятствие обеспечивает возможность частичного или полного погружения в жидкую или сильно сыпучую среду и предназначено для оценки маневрирования в таких условиях. Модуль представляет собой бассейн габаритными размерами 3 х 11 м и глубиной до 0,6 м. Размер дна составляет 3 х 3 м, пандусы для заезда имеют угол наклона 20°.

Рисунок 5 – Модуль бассейна (осушенный)

6. Модуль реконфигурируемых помещений (см. рис. 6).

Модуль предназначен для воссоздания условий ограниченных пространства и видимости и для имитации обстановки помещений. В состав модуля входят реконфигурируемые сооружения для воссоздания интерьера складских, жилых и прочих помещений.

Рисунок 6 – Модуль реконфигурируемых помещений

7. Завал, имитирующий останки разрушенной постройки (см. рис. 7)

Испытание применяется для проверки возможности взаимодействия с завалами построек, возможности их демонтажа или извлечения предметов из завала.

Рисунок 7 – Завал

8. Автомобиль (см. рис. 8), предназначенный для проведения испытаний манипуляционных систем.

Рисунок 8 – Автомобиль

Результаты испытаний

На полигоне проведены предварительные испытания мобильного робототехнического комплекса РТК-05. Технические характеристики комплекса:

– габаритные размеры – 1480 х 650 х 800 мм;
– масса – 270 кг;
– максимальная скорость движения – 0,5 м/с;
– максимальная грузоподъемность манипулятора – 10 кг;
– время непрерывной работы – 2 ч.

Ниже представлены результаты проведенных испытаний по маневренности: в табл. 2 – по восхождению на наклонные поверхности; в табл. 3 – по спуску с наклонных поверхностей с торможением; в табл. 4 – по преодолению горизонтальных участков и разворотов на них; в табл. 5 – по преодолению участков с железнодорожным полотном. На рисунке 9 приведены примеры преодоления препятствий мобильным робототехническим комплексом РТК-05.

Таблица 2. Результаты испытаний мобильного робототехнического комплекса РТК-05 по восхождению на наклонные поверхности

Тип уклона	**Кол-во попыток**	**Кол-во успешных попыток**	**Средняя скорость прохождения, м/с**
Песчаный уклон 20°	4	4	0,08
Песчаный уклон 25°	3	0	–
Песчаный уклон 30°	1	0	–
Гравийный уклон 20°	4	4	0,21
Гравийный уклон 30°	2	2	0,07
Гравийный уклон 40°	1	0	–
Бетонный уклон 20°	4	2	0,34
Бетонный уклон 30°	4	0	–
Лестничный марш	3	0	–

Таблица 3. Результаты испытаний мобильного робототехнического комплекса РТК-05 по спуску с торможением с наклонных поверхностей

Тип уклона	**Кол-во попыток**	**Средняя длина тормозного пути, м**
Песчаный уклон 20°	3	0
Песчаный уклон 25°	2	0
Песчаный уклон 30°	1	0
Гравийный уклон 20°	3	0,020
Гравийный уклон 30°	3	0,035
Гравийный уклон 40°	2	0,019
Бетонный уклон 20°	3	0,002
Бетонный уклон 30°	2	0,010

Таблица 4. Результаты испытаний мобильного робототехнического комплекса РТК-05 по преодолению горизонтальных участков и разворотов

Тип испытания	**Кол-во попыток**	**Кол-во успешных попыток**	**Средняя скорость выполнения**
Прохождение участка пересеченной местности	4	4	0,06 м/с
Разворот на участке пересеченной местности	2	0	–
Разворот на песке	2	1	10°/с
Разворот на гравии	2	2	15°/с

Таблица 5. Результаты испытаний по преодолению участков с железнодорожным полотном

Тип полотна и направление	**Кол-во попыток**	**Кол-во успешных попыток**	**Средняя скорость прохождения, м/с**
Деревянные шпалы, вдоль рельс	3	3	0,15
Бетонные шпалы, вдоль рельс	3	3	0,15
Деревянные шпалы без насыпи, поперек рельс	2	2	0,19
Бетонные шпалы без насыпи, поперек рельс	2	2	0,19
Деревянные шпалы с насыпью, поперек рельс	2	2	0,18
Бетонные шпалы с насыпью, поперек рельс	2	2	0,18

Для мобильного робототехнического комплекса РТК-05 оказались непреодолимыми наклонные песчаные участки крутизной более 20°, на таких участках робот увязал в песке и садился на дно. По той же причине не удалось преодолеть участок с гравийным уклоном крутизной 40°. Бетонный наклонный участок крутизной 30° не удалось пройти из-за слабого сцепления колес с поверхностью. На данный момент из-за неровности поверхности, на которую установлено препятствие, первая ступень лестничного марша выше остальных, в связи с этим лестничный марш робот преодолел, только находясь целиком на ступенях, при этом движение происходило по диагонали. Предполагается, что при устранении разницы в высоте ступеней, лестничный марш станет возможным для преодоления этим робототехническим комплексом. Участок с пересеченной местностью преодолевается только параллельно граням блоков, что связано с большим перепадом высот в сравнении с диаметром колес, поэтому разворот или движение по дуге является невозможным для данной конфигурации мобильной платформы. Также стоит отметить, что прямолинейное движение по песчаным уклонам, а также развороты на песчаных и гравийных поверхностях осуществляются только с попеременным движением вперед-назад, в результате которого грунт насыпается под колеса и предотвращает оседание робота на дно. По результатам испытаний видно, что вид шпал (деревянные или бетонные) железнодорожного полотна не влияет на проходимость испытаний. Наличие насыпи, на которую установлено железнодорожное полотно не вносит существенного влияния на скорость прохождения.

Рисунок 9 – Примеры преодоления препятствий

С использованием результатов проведенных предварительных испытаний по маневренности составляются методики проведения испытаний мобильных робототехнических комплексов, а также вносятся корректировки по комплектации и оснащению полигона. В дальнейшем при применении разрабатываемых методик к робототехническим комплексам различных массогабаритных характеристик планируется оценка необходимости составления отдельных методик для комплексов различных массогабаритных характеристик.

Публикация подготовлена в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России. Проект № 9.9377.2017/8.9.

1. Sheppard T. Autonomous Systems Test and Evaluation Requirements Study: A Roadmap to Robust Testing of Autonomous Systems // ISRCS 2012.
2. Test Operations Procedure (TOP) 01-1-011A Vehicle Test Facilities at Aberdeen Test Center and Yuma Test Center. [Электронный ресурс] URL: www.dtic.mil/get-tr-doc/pdf?AD=ADA557002. (Дата обращения: 01.12.2017).
3. Цариченко С.Г., Максимов А.А., Сидоров И.М., Родиченко Н.С. Комплекс для полигонных испытаний роботизированных систем по оценке эффективности захвата и сопровождения целей // Робототехника и техническая кибернетика, -2015. -№2(7). –С.3-10.
4. Цариченко С.Г., Сидоров И.М., Симанов С.Е. Комплексные функциональные испытания робототехники специального назначения // Робототехника и техническая кибернетика, -2016. -№4(13). –С.59-63.
5. Официальный сайт ФКП «НИИ «Геодезия»». [Электронный ресурс] URL: http://niigeo.ru/. (Дата обращения: 01.12.2017).
6. Официальный сайт ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ». [Электронный ресурс] URL: http://nami.ru/. (Дата обращения: 01.12.2017).
7. Статья о автомобильном полигоне ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ» [Электронный ресурс] URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Автополигон_НАМИ. (Дата обращения: 01.12.2017).
8. Raymond Sheh, Adam Jacoff, Ann-Marie Virts, Tetsuya Kimura, Johannes Pellenz, Soren Schwertfeger, and Jackrit Suthakorn. Advancing the State of Urban Search and Rescue Robotics through the RoboCupRescue Robot League Competition. 8th International Conference on Field and Service Robotics (FSR 2012), Matsushima, Japan, 16-19 July 2012.
9. Johannes Pellenz , Adam Jacoff , Tetsuya Kimura , Ehsan Mihankhah , Raymond Sheh , and Jackrit Suthakorn. RoboCup Rescue Robot League [Электронный ресурс] URL: http://fei.edu.br/rcs/2014/SpecialTrackAdvancement/robocupsymposium2014_submission_78.pdf. (Дата обращения: 01.12.2017).
10. Регламент соревнований «Кубок РТК» [Электронный ресурс] URL: http://cup.rtc.ru/images/doc/reglament-2017/Reglament_03-08-2017.pdf. (Дата обращения: 01.12.2017).

D.D. Lipovskiy, Yu.A. Denisenya, A.V. Vasilev

SPECIAL REQUIREMENTS TO ROBOTIC COMPLEXES OF MILITARY UNITS OF RADIOLOGICAL, CHEMICAL AND BIOLOGICAL DEFENSE

Federal State Budgetary Institution «The 33rd Central Research Test Institute of the Ministry of Defense of Russian Federation»

Д.Д. Липовский, Ю.А. Денисеня, А.В. Васильев

СПЕЦИАЛЬНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К РОБОТОТЕХНИЧЕСКИМ КОМПЛЕКСАМ ВОЙСК РАДИАЦИОННОЙ, ХИМИЧЕСКОЙ И БИОЛОГИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ

Федеральное государственное бюджетное учреждение «33 Центральный научно-исследовательский испытательный институт» Министерства обороны Российской Федерации

Роботизация Вооруженных Сил Российской Федерации (ВС РФ) является составной частью общего процесса повышения качественного уровня вооружения и военной техники и рассматривается как одно из важнейших направлений совершенствования и качественного обновления тактических войсковых формирований, способов решения боевых и обеспечивающих задач, которые могут результативно выполняться с применением робототехнических комплексов (РТК).

Целю роботизации ВС РФ является освоение безлюдных (малолюдных) военных технологий, обеспечивающих полное или частичное исключение личного состава при решении боевых и обеспечивающих задач, сопряженных с опасностью для жизни и здоровья.

В связи с этим в настоящее время уделяется большое внимание развитию военной робототехники. Уже создан и принят на снабжение ряд боевых и разведывательных робототехнических комплексов. В интересах войск РХБ защиты приняты на снабжение:

– комплекс подвижный робототехнический КПР, шифр «Разнобой», в состав которого вошли два тяжелых гусеничных мобильных робота МРК-45 и МРК-46, в последствии при модернизации МРК-45 был заменён на более легкий МРК-РХ;

– мобильный робот МРК-РХ после принятия на снабжение поступил на замену МРК-45 из состава КПР и вошел в состав комплекса мобильного поиска, сбора и контейнирования источников ионизирующих излучений КМ-ПИИ;

– робот дистанционно управляемый радиационной и химической разведки РД-РХР, шифр «Берлога-Р», который вошел в состав машины РХМ-7 и машины радиационной разведки из состава мобильной диагностической группы;

– целевые нагрузки воздушной радиационной и химической разведки для комплекса 576 на базе малогабаритного беспилотного летательного аппарата.

В настоящее время в интересах войск РХБ защиты ВС РФ проводится ОКР по разработке робототехнического комплекса войск РХБ защиты. В рамках данной работы разрабатывается комплекс робототехнический многофункциональный наземный войск РХБ защиты МРК-РХБЗ, состоящий из:

– комплекса воздушной разведки КВР;

– комплекса робототехнического специального РТК-С;

– комплекса робототехнического разведывательного РТК-Р.

Одновременно проводится ОКР по разработке машины РХБ разведки в состав которой также будут включены роботизированный бортовой комплект отбора проб грунта и комплекс воздушной радиационной разведки местности.

Несмотря на то, что войска РХБЗ были одними из первых, кто принял на снабжение робототехнические комплексы, сегодня развитие робототехники затронуло практически все подразделения Вооруженных Сил.

Комплексная программа «Роботизация ВВТ-2015», начавшаяся в 2000 году была направлена на проведение общесистемных исследований, формирование научно-технического и технологического заделов, разработку экспериментальных и опытных образцов РТК. В рамках этой программы был

разработан и создан целый ряд прототипов мобильных роботов (МР), в том числе тяжелый РТК «Алиса», легкий РТК «Клавир», легкий минный тральщик на базе штатной инженерной разведывательной машины, носимый дистанционно управляемый минироботразведки и наблюдения.

В 2017 году в рамках II-й Военно-научной конференции «Роботизация Вооруженных Сил Российской Федерации» и выставки «Армия-2017» были представлены новейшие разработки, опытные образцы и серийные боевые и разведывательные робототехнические комплексы.

Акционерным обществом «ЦНИИ «Буревестник» представлен экспериментальный образец робототехнического комплекса «Вихрь», предназначенный для установки на перспективные и модернизированные боевые бронированные машины с целью повышения огневой мощи мотострелковых и пехотных подразделений.

Открытым акционерным обществом «766 УПТК» представлен робототехнический комплекс «Уран-9», предназначенный для повышения эффективности выполнения задач и снижения потерь личного состава подразделений при ведении боевых действий, в том числе на урбанизированной местности и в городских условиях, а также для выполнения контртеррористических операций.

В состав комплекса входят 4 робота огневой поддержки, подвижный пункт управления и средства транспортировки.

Для целей охраны и обороны разрабатываются стационарные и передвижные боевые робототехнические модули, некоторые из них уже прошли государственные испытания и применяются на особо важных объектах.

Одним из направлений программы роботизации является создание систем дистанционного управления штатных единиц боевой техники, так был создан дистанционно управляемый робототехнический комплекс «Калининград».

Широко используются РТК для инженерных и спасательных служб, как в интересах МЧС, так и Вооруженных Сил.

В качестве инженерных и спасательных машин стоит отметить комплексы:

– робототехнический комплекс «Уран-6», предназначенный для инженерной разведки местности, проделывания проходов в минно-взрывных заграждениях и площадного разминирования территорий;

– робототехнические комплексы ЕЛЬ-10 и ЕЛЬ-6, предназначенные для тушения пожаров и ведения инженерных работ в районах ликвидации чрезвычайных ситуаций;

– мобильный робототехнический комплекс разведки и пожаротушения, предназначенный для проведения визуальной и приборной разведки при спасательных и аварийно-восстановительных работах, выполнения работ по пожаротушению при ликвидации локальных очагов возгораний на спецобъектах;

– РТК «Эквивалент-2», дистанционно-управляемый роботизированный комплекс для оказания первой медицинской помощи и эвакуации раненых с поля боя, созданный на базе МТ-ЛБ.

Для целей выполнения различных разведывательных задач также создаются робототехнические комплексы легкого и сверхлегкого класса. В качестве примеров стоит привести:

– малогабаритный разведывательный робот «Кадет»;

– забрасываемый телеметрический робот для разведки труднодоступных помещений;

– мобильный малогабаритный забрасываемый робот «ЮЛА»;

– робототехническое средство «TeleMAX»;

– мобильный робототехнический комплекс РТК-10;

– мобильный робототехнический комплекс МРК-28МА.

Стоит также отметить все возрастающий интерес к беспилотным летательным аппаратам (БЛА), основное предназначение которых – ведение воздушной разведки. БЛА сегодня широко применяются во всем мире от Вооруженных Сил, до любительской видеосъемки. Кроме разведывательных создаются и БЛА специального назначения, имеющие на борту ракетное и бомбовое вооружение, средства радиоэлектронной борьбы и т.д.

Сегодня спектр беспилотных летательных аппаратов, даже выпускаемых в Российской Федерации достаточно широк. В качестве примеров отечественных БЛА можно привести:

– комплексы дистанционного наблюдения «Элерон-10СВ» и «Элерон-3СВ», успешно прошедшие Государственные испытания и выпускаемые серийно;

– беспилотные летательные аппараты «Supercam» самолётного и вертолётного типа, разработанные группой компаний «Беспилотные системы»;

– экспериментальный беспилотный летательный аппарат «НЕЛК-В8» с бортовой энергетической установкой на низкотемпературных водородных топливных элементах;

– многофункциональные комплексы воздушной разведки местности и объектов на основе беспилотного воздушного судна вертикального взлета и посадки «НЕЛК-В6-М1», «НЕЛК-В6-М2», предназначенные для проведения телевизионной, инфракрасной, радиотехнической, радиолокационной, инженерной разведки, выявления электронных компонентов мино-взрывных устройств в грунте, доставки малогабаритных грузов в труднодоступные места.

Не меньше возможностей представляет развитие робототехники для условий водной среды. Так на II-й Военно-научной конференции «Роботизация Вооруженных Сил Российской Федерации» были представлены:

– многофункциональный роботизированный комплекс на базе безэкипажного катера, предназначенный для оперативного решения задач мониторинга морской среды, обеспечения поисково-спасательных операций на море;

– подводные роботизированные необитаемые аппараты серии «Гном», разработанные в компании ООО «Подводная робототехника», широко применяемые в ВМФ, службах МЧС, научных и коммерческих учреждениях, водолазных службах;

– автономный необитаемый надводно-подводный аппарат «ПИНГВИН», предназначенный для сбора гидрографической информации, ведения гидроакустической разведки, поиска, обнаружения, идентификации донных объектов.

Таким образом, в настоящее время имеется большой выбор различных робототехнических комплексов, которые можно рассматривать для решения задач, стоящих перед подразделениями войск РХБ защиты.

Целями применения РТК военного назначения в войсках РХБ защиты являются:

– повышение боевых возможностей войск РХБ защиты;

– снижение потерь личного состава;

– высвобождение личного состава для выполнения других задач;

– увеличение эффективности и снижение времени выполнения задач.

Для достижения поставленных целей использование робототехнических комплексов возможно при решении задач по РХБ разведке, специальной обработке, а также применении огнеметно-зажигательного вооружения и средств аэрозольного противодействия.

При этом следует учесть, что применение РТК при ведении химической разведки и ликвидации последствий аварий на химически опасных объектах оправдано лишь в тех случаях, когда объект и прилегающая к нему местность заражены химическими веществами, против которых не существует доступных и эффективных средств защиты личного состава. А так же в ситуациях, для которых контроль над опасным объектом (территорией) необходимо вести только на достаточном удалении от него, где нахождение личного состава, даже в средствах защиты, будет невозможным вследствие угрозы взрыва или пожара. Кроме того, ведение химической разведки в очаге и опасных зонах с неизвестными веществами предполагает использование изолирующих противогазов и изолирующей защитной одежды, которые ограничивают время пребывания личного состава в зоне заражения по физиологическим возможностям человека.

При выполнении задач на радиоактивно-загрязненной местности следует учитывать, что эффективных средств защиты от ионизирующего излучения не существует. Применение тяжелой техники лишь продлевает время выполнения работ, но не исключает облучение личного состава. Единственными эффективными способами защиты является нахождение на максимально возможном расстоянии и сокращение времени пребывания на загрязненной территории. Способы защиты личного состава реализуются с применением РТК, поскольку нахождение обслуживающего персонала предполагается на максимально-возможном удалении от места аварии, ограниченном дальностью управления РТК.

С учетом современных возможностей робототехнических средств на них возлагаются следующие задачи:

– ведение радиационной и химической разведки местности и приземного слоя воздуха с помощью бортовых приборов;

– доставка и установка датчиков, автономных приборов и т.п. оборудования, предназначенного для автоматического контроля радиационной и химической обстановки;

– выявление и обозначение границ зон (участков) радиационного и химического заражения местности;

– отбор проб воздуха, воды, почвы, растительности и других материалов для их дальнейшего исследования в химических лабораториях;

– ведение видео- и фотосъемки разрушенного (аварийного) объекта;

– обнаружение и локализация источников ионизирующего излучения.

Учитывая большое разнообразие существующих робототехнических средств и задачи, стоящие перед подразделениями РХБ защиты, можно сформулировать перечень специальных требований, предъявляемых к робототехническим комплексам войск РХБ защиты ВС РФ. При этом следует учитывать, что робототехнические комплексы войск РХБ защиты являются сложным изделием, состоящими не только из мобильных роботов, но и транспортных машин с командными пунктами управления.

Представленные на рисунке 1, специальные требования к робототехническим комплексам следует разделять на: защищенность личного состава, находящегося на пункте управления; стойкость радиоэлектронной аппаратуры к многократному воздействию ионизирующего излучения; стойкость к штатным средствам дегазации и дезактивации.

Рисунок 1 – Специальные требования к робототехническим комплексам войск РХБ защиты

Данные требования являются обязательными для робототехнических комплексов, планируемых к применению в войсках РХБ защиты, РТК будут выполнять задачи на радиоактивно загрязненной или химически зараженной местности, то после каждого применения комплексы в обязательном порядке будут подвергаться специальной обработке с целью возможности их дальнейшей эксплуатации. Кроме того, учитывая реальный опыт эксплуатации РТК при ликвидации аварии на Чернобыльской АЭС сбои в работе РТК возникали при экспозиционной дозе от 10 до 100 Рентген, а отказы – от 100 до 10000 Рентген [1].

Сегодня нет четкого определения данных требований и для каждого образца РТК их либо задают индивидуально, исходя из пожеланий заказчика, либо не задают совсем, что для РТК войск РХБ защиты не приемлемо.

При разработке нового робототехнического комплекса войск РХБ защиты с целью проверки обеспечения требуемой степени защищённости от воздействия ионизирующего излучения были проведены испытания на стойкость к воздействию гамма-излучения 41 элемента из состава РТК.

При проведении испытаний оценивалась работоспособность элемента как при воздействии гамма-излучения, так и при достижении значений поглощенной дозы, заданных в техническом задании. В качестве составных элементов робототехнических комплексов были проведены испытания всех электродвигателей совместно с контроллерами управления, аппаратуры передачи данных, антенных устройств, систем видеонаблюдения, источников электропитания (батареи, преобразователи, зарядные устройства), бортовых и панельных компьютеров, различных датчиков и отдельных радиоэлементов. Данные испытания позволили выявить ряд элементов, не обеспечивающих требуемые уровни стойкости к воздействию ионизирующего излучения.

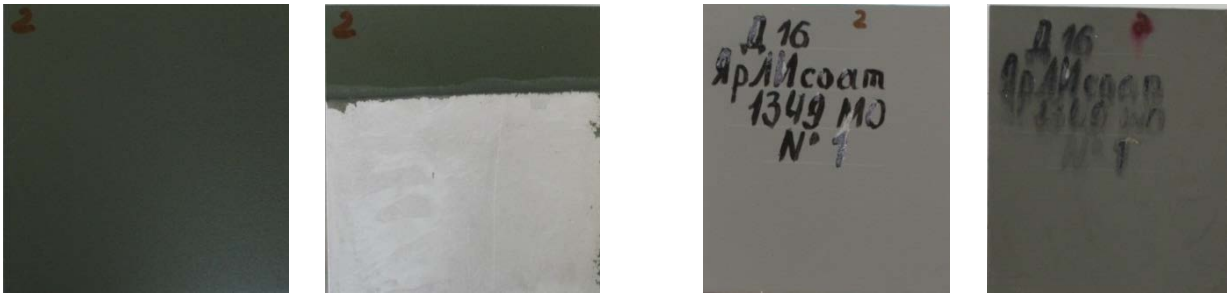
до испытания после испытания до испытания после испытания

Внешний вид образца № 1 Внешний вид образца № 2

до испытания после испытания до испытания после испытания

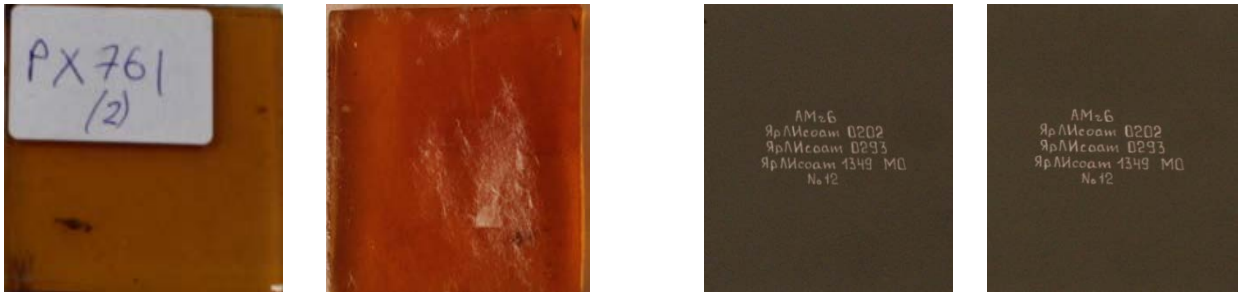
Внешний вид образца № 3 Внешний вид образца № 4

Рисунок 2 – Результаты предварительных испытаний по стойкости материалов и лакокрасочных покрытий к дегазирующими растворами № 1 и № 2



до испытания после испытания до испытания после испытания

Внешний вид образца № 1 Внешний вид образца № 2



до испытания после испытания до испытания после испытания

Внешний вид образца № 3 Внешний вид образца № 4

Рисунок 3 – Результаты предварительных испытаний по стойкости материалов и лакокрасочных покрытий к воздействию рецептуры РД-2

В ходе проведения экспериментов был проведен сравнительный анализ влияния замены в видеокамерах импортной электронной компонентной базы на отечественную, который показал, что обе видеокамеры оставались в рабочем состоянии и обеспечивали выполнение требований тактико-технического задания, однако видеокамера с импортной электронной компонентной базой обеспечивала более качественное изображение, но имела меньшую радиационную стойкость.

Для определения соответствия требованиям по стойкости к внешним воздействующим факторам, а именно к воздействию дегазационных и дезактивационных растворов и рецептур был проведен анализ результатов испытаний составных частей робототехнических комплексов. Испытаниям подвергались как образцы лакокрасочных покрытий, так и отдельные элементы робототехнического комплекса, кроме того были проведены оценочные испытания по стойкости конструкционных материалов (резиновые уплотнители, полимерные материалы и т.д.).

Испытания на стойкость к воздействию специальных растворов прошли более 35 различных образцов (изделий и материалов). Отдельные результаты испытаний представлены на рисунках 2 – 3.

Анализ результатов проведенных испытаний показывает, что:

– наибольшее воздействие на лакокрасочные покрытия оказывают дегазирующие растворы № 1, 2 и дегазирующая рецептура РД-2. При этом стоит отметить, что стойкость лакокрасочного покрытия определяется не только типом применяемого красителя, но и точным соблюдением технологии окраски. Это хорошо видно на примере образцов № 2 и 4, представленных на рисунках 2 и 3. Обе пластины окрашены эмалью ЯрЛИ соат 1349 МО, но в образце 4 соблюдена технология окраски с предварительным нанесением грунта. Как видно из рисунков 2, 3 в образце 2 произошло полное разрушение лакокрасочного покрытия, а в образце 4 наблюдалось только незначительное изменение твердости покрытия;

– водные рецептуры порошка СФ-2У на все образцы лакокрасочных покрытий и изделия не оказывают существенного воздействия;

– оценочные испытания пластин, изготовленных из полимерных материалов, позволили выявить материалы, применение которых в робототехническом комплексе войск РХБ защиты не допустимо, по причине их разрушения под воздействием дегазирующих растворов № 1 и № 2.

В ходе проведенного анализа были выявлены элементы конструкций РТК, которые не обеспечивали требуемую стойкость к воздействию специальных сред и разработчику было рекомендовано исключить их из конструкции МРК-РХБЗ.

Таким образом, при создании новых или модернизации существующих РТК, для применения в войсках РХБЗ необходимо проведение полного цикла испытаний на соответствие образца специальным требованиям, а именно:

– стойкости к воздействию дегазационных и дезактивационных растворов и рецептур;

– радиационной стойкости РТК;

– защищенности личного состава от излучения радиоактивно-загрязненной местности и химического заражения.

1. Боровой А.А. К 25-летию аварии на Чернобыльской АЭС. Работы «Курчатовского института» по ликвидации последствий аварий [Текст] / А.А. Боровой, У.П. Велихов // НИЦ «Курчатовский институт». – М., 2011. – 132 с.

A.V. Lekareva, A.A. Kobzev, A.A. Mahfouz

FEATURES OF CONSTRUCTING A MOBILE ROBOTIC COMPLEX OF WATERJET CUTTING OF OIL PIPELINES

Vladimir state university of name A.G. and N. G. Stoletovykh, Vladimir, tasya671@rambler.ru

Abstract

The present work is devoted to the automation of the process of waterjet cutting of oil pipelines and oil storages based on the application of a mobile robotic hydraulic cutting complex consisting of a transport and multi-axis technological robots. In this paper, the features of the process as well as objects of cutting are considered. The features of the mobile robotic complex and control tasks that determine the algorithms and structure of its control system are singled out. The rational kinematics of the technological robot - the robot type PUMA is determined, the analysis results of its working zones are presented. To coordinate the axes of the cutting object and to compensate for the nonideality of the cutting surface, it is suggested to introduce an additional coordinate of the oscillation of the working element and a measuring system for determining the distance to the cutting surface from two symmetrically arranged inductive sensors forming a differential fork. The main algorithms for controlling a mobile robotic complex are considered.

Key words: hydroabrasive cutting, oil pipeline, robotic complex, technological robot, kinematic scheme, working area, axle matching, intercoordinate correction, complementary control, neural network controller.

А.В. Лекарева, А.А. Кобзев, А.А. Махфуз

ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ МОБИЛЬНОГО РТК ГИДРОАБРАЗИВНОЙ РЕЗКИ ТРУБ НЕФТЕПРОВОДОВ

Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, Владимир
tasya671@rambler.ru

Аннотация

Настоящая работа посвящена вопросу автоматизации процесса гидроабразивной резки нефтепроводов и нефтехранилищ на основе применения мобильного робототехнического комплекса гидрорезания, состоящего из транспортного и многокоординатного технологического роботов. В работе рассмотрены особенности процесса, а также объектов резания. Выделены особенности мобильного робототехнического комплекса и задачи управления, определяющие алгоритмы и структуру системы его управления. Определена рациональная кинематика технологического робота - вида робота PUMA, представлены результаты анализа его рабочих зон. Для согласования осей объекта резания и компенсации неидеальности поверхности резания предложено введение дополнительной координаты качания рабочего органа и измерительной системы определения расстояния до поверхности резания из двух симметрично расположенных индуктивных датчиков, образующих дифференциальную вилку. Рассмотрены основные алгоритмы управления мобильным робототехническим комплексом.

Ключевые слова: гидроабразивная резка, нефтепровод, робототехнический комплекс, технологический робот, кинематическая схема, рабочая зона, согласование осей, межкоординатная коррекция, комплементарное управление, нейросетевой регулятор.

Анализ объекта роботизации

Ежегодный рост объемов добычи нефти приводит к постоянному расширению мировой сети нефтепроводов и связанных с ними нефтехранилищ. Это характерно как для России, США, так и для стран Ближнего Востока. По состоянию на 2013 год протяженность нефтепроводов, с учетом нефтепродуктопроводов составила: в России – 94.478 тыс. км., в США – 240.711 тыс. км., в странах Ближнего Востока – 16.5. тыс. км. [1]. При обслуживании и эксплуатации нефтепроводов и нефтехранилищ необходимо периодическое выполнение следующих операции: врезка ответвлений; контроль и инспекция трубопроводов; замена поврежденных труб; наложение слоя покрывающего изоляционного материала; внутренняя очистка трубы от различных типов отложений, таких как парафин, коррозия и др.; замена предохранительных элементов трубы и др.

Для проведения очистных, контрольных, монтажных работ на поверхностях труб и резервуаров вырезаются технологические отверстия различной формы. Горючие отложения на внутренних поверхностях не допускают применения для их резки методов, сопровождающихся пламенем и искрой, таких как резка металлическим инструментом, электро- и газорезка, лазерная резка. Здесь весьма эффективно применение процесса гидрорезания водной струей с абразивом, реализуемого специализированным мобильным робототехническим комплексом (РТК), состоящим из транспортной системы и расположенных на ней многокоординатного технологического робота (ТР) и системы гидроабразивной резки.

С целью построения рациональной структуры системы управления РТК, выделим особенности процесса гидроабразивной резки, а также особенности нефтепроводов и нефтехранилищ, как объектов резания:

1) характеристика нефтепроводов, как объектов резания:

– расположение труб относительно уровня поверхности: наземные, подземные (ниже уровня на 1-2 м), надземные (выше уровня на 2-4 м);

– размеры диаметров труб: 0.3 -1.2 м с разбивкой на 4 группы;

– вырезаемые профили: окружность на боковой поверхности (цилиндре); фигура, образованная при пересечении двух цилиндров с разными диаметрами; прямоугольный профиль при виде по нормали к боковой (цилиндрической) поверхности;

2) характеристика нефтехранилищ:

– форма: цилиндрические вертикальные и горизонтальные;

– диаметр цилиндров: 4.7-95.4 м;

– высота: 5-18 м;

– вырезаемые профили: прямоугольник при виде по нормали к боковой поверхности с размерами в пределах 2×4 м; прямоугольник или окружность для плоской поверхности (на торце или крыше);

3) толщина стенок изменяется в зависимости от диаметра трубопроводов и нефтехранилищ и колеблется в пределах 5-20 мм, что определяет разные скорости резания.

4) возможна неравномерность внешней боковой поверхности, обусловленная сварными швами, (ширина 5-15 мм, высота 5 - 10 мм), деформациями, загрязнениями, вмятинами и др. факторами. В аналитическом плане каждый вид описывается своей функциональной зависимостью (прямая, гипербола, парабола и др.). Принципиально, что функции, описывающие дефект, являются гладкими.

5) расположение нефтепроводов в труднодоступных районах.

6) необходимость стабилизации расстояния от сопла (поверхность среза) до поверхности резания и расположения его продольной оси по нормали к поверхности резания.

Состав и функциональная схема мобильного РТК

Функциональная схема РТК представлена на рисунке 1.

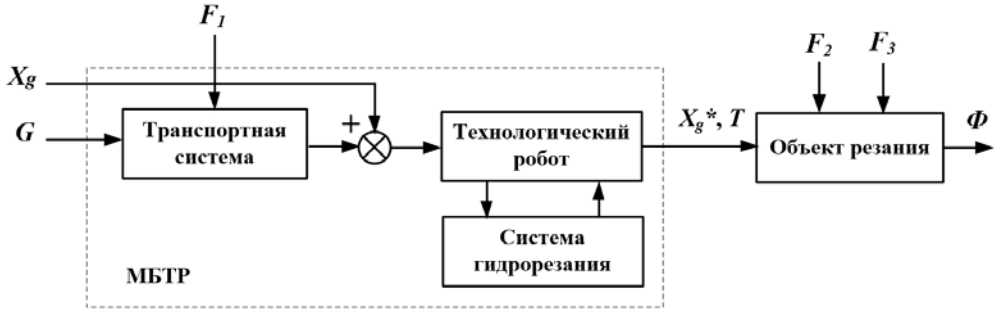


Рисунок 1 – Функциональная схема мобильного РТК

Входными данными при реализации процесса гидроабразивной резки нефтепроводов являются:

1) координаты точки выхода на позицию резания G, задаваемые транспортной системе;

2) управляющая программа X_g для технологического робота, обеспечивающая воспроизведение заданного профиля Φ вырезаемой поверхности трубы и соответствующие ей технологические параметры T. Неточность выхода РТК в исходную точку резания приводит к отклонению фактических координат расположения и ориентации объекта резания в пространстве относительно заданных ΔX. Кроме того, неидеальность поверхности резания, обусловленная деформациями, вмятинами,

сварочными швам, загрязнениями и другими факторами, служит источником отклонений идеальной (программной) и фактической траектории резания ΔG. Поэтому, необходимо обеспечить согласование осей систем координат РТК и объекта резания, а также компенсировать отклонение формы фактической поверхности резания от программной. На схеме показаны эквивалентные возмущения: F_1 – со стороны рельефа местности при движении транспортной системы; F_2, F_3 - порождающие отклонения ΔX, ΔG.

Выделим особенности мобильного РТК и задачи управления, определяющие алгоритмы и структуру системы управления РТК.

Особенности:

– РТК состоит из двух последовательно соединенных систем – транспортной системы (мобильного робота) и технологического робота;

– неопределенность рельефа местности при движении мобильного робота и, как следствие, ограниченная точность выхода мобильного робота в исходную точку для работы технологического робота;

– неопределенность в малом пространственного взаимного расположения технологического робота и поверхности резания;

– неидеальность поверхности резания (трубы, резервуара), обусловленная сварными швами, деформациями, загрязнением и др.).

Задачи управления:

– согласование систем координат технологического робота и объекта резания, ввод корректирующих поправок в базовую программу;

– управление перемещением рабочего органа РТК по траектории, соответствующей заданной форме и размерам фигуры резания в условиях неидеальности поверхности резания;

– стабилизация расстояния сопла (поверхность среза) от поверхности резания;

– обеспечение ориентации струи по нормали к поверхности резания в текущей точки технологической траектории.

Выбор кинематической структуры технологического робота

Свойства и характеристики ТР в значительной степени определяются кинематической схемой и характеризуются следующими показателями: структурой; рабочей зоной; системой координат, в которой осуществляется движение манипулятора; числом степеней подвижности; манёвренностью; мобильностью.

При структурном синтезе механизма манипулятора необходимо прежде всего учитывать следующее:

1) кинематические пары манипуляторов снабжаются приводами, включающими двигатели и тормозные устройства, поэтому в схемах манипуляторов обычно используются одноподвижные кинематические пары: вращательные или поступательные;

2) необходимо обеспечить не только заданную подвижность рабочего органа манипулятора, но и такую ориентацию осей кинематических пар, которая обеспечивала бы необходимую форму зоны обслуживания, а также простоту и удобство программирования его движений;

3) при выборе ориентации кинематических пар необходимо учитывать расположение приводов (на основании или на подвижных звеньях), а также способ уравновешивания сил веса звеньев;

4) необходимо учитывать габаритные размеры и конфигурацию технологического объекта, расположение вырезаемых поверхностей и полостей.

Анализ обозначенных объектов резания, свидетельствует о проблематичности создания универсального ТР. Следует определить требования для каждого случая, выбрать базовую кинематику, размеры плеч и проанализировать варианты их совместимости с позиции возможной реализации [2].

Анализ типовых схем манипуляторов [3] применительно к рассматриваемому процессу гидрорезания свидетельствует, что наиболее целесообразным является применение трехзвенного или четырехзвенного манипулятора, работающего в ангулярной сферической системе координат. Проверка требуемого числа степеней подвижности по формуле Сомова – Малышева [4] показала, что необходимое число степеней подвижности - 6. Упрощённая кинематическая схема ТР с обозначениями систем координат звеньев представлена на рисунке 2.

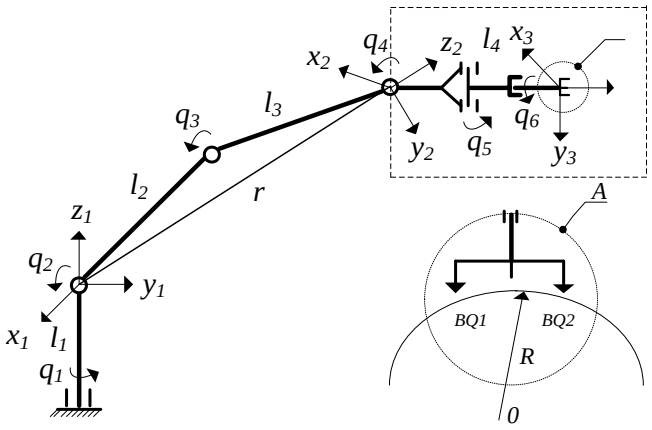


Рисунок 2 – Кинематическая схема технологического робота

Функционально кинематическую схему разделим на две системы – несущую и исполнительную. Несущая система содержит 3 звена, соответственно три управляемые координаты: одна вращательная q_1 и две (возможно три) угловые q_2, q_3. Рабочий орган представляет головку гидрореза и два датчика, звено 4. Для управления ориентацией рабочего органа в точке резания и организации поисковых движений в режимах ориентации и согласования осей ТР и объекта резания в звене 4 манипулятора введены три управляемые координаты. Две из них – углы качания α, β относительно горизонтальных осей X, Y, соответственно q_4, q_5, четвертая – вращение относительно продольной оси звена q_6. Также для выполнения поисковых движений и с целью стабилизации расположения струи по нормали к поверхности введена измерительная система типа дифференциальной вилки [5], состоящая из двух датчиков *BQ1*, *BQ2*, расположенных на штанге, перпендикулярной к продольной оси звена 4, симметрично относительно центра штанги, ось которой совмещена с продольной осью струи. Контроль перпендикулярности оси сопла относительно продольной оси трубы обеспечивается при равенстве расстояний l_1, l_2 до контролируемой поверхности. Аналогично контролируется перпендикулярность относительно поперечной образующей трубы. Величина расстояния от среза сопла до поверхности резания задается значением h_0, которое при известном диаметре трубы пересчитывается в контрольные значения l_{10}, l_{20}.

При выборе датчиков следует учесть особенности процесса гидроабразивной резки трубопровода, такие как: разбрызгивание и вспенивание водно-абразивной смеси, отложение абразивного вещества в зоне резания, загрязнение поверхности трубы, нарушение защитной опрессовки, коррозию поверхности трубы, неблагоприятные погодные условия – дождь, туман, запыленность воздуха.

На основе проведенного анализа для вариантов резания поверхностей в виде: 1) прямоугольников с размерами 0.6×0.8 м и окружностей с диаметром до 0.8 м на наземных трубопроводах с максимальным диаметром труб 1.2-1.6 м; 2) прямоугольников с размерами до 4×3м на нефтехранилищах в виде цилиндра с диаметром 7 м и высотой 5 м могут быть рекомендованы геометрические параметры звеньев кинематической цепи технологического робота, приведенные в таблице 1.

Таблица 1. Геометрические параметры звеньев кинематической цепи технологического робота

Звено	Длина плеча, мм	Угол качания, относительно продольной оси предыдущего звена, град	Примечание
1	400	$-90 \le q_1 \le 90$	Вращение относительно вертикальной оси
2	1600	$0 \le q_2 \le 90$	Исходное положение - горизонтальное
3	800-1440	$-90 \le q_3 \le 0$	Исходное положение - горизонтальное
4	200-400	$-135 \le q_4 \le 135$	Качение относительно оси X
4	200-400	$-30 \le q_5 \le 30$	Качение относительно оси Y
4	200-400	$-90 \le q_6 \le 90$	Вращение относительно продольной оси звена

Анализ рабочих зон

Проведем анализ рабочих с зон технологического робота с учетом габаритов транспортной системы и объекта резания для варианта наземного расположения трубопровода. Анализ рабочих зон дается применительно к специализированному роботу с размерами звеньев 1-4 соответственно [мм]: 400, 1600, 1200, 200. Для построения и оценки рабочих зон могут быть использованы [4]: 1) метод проекций; 2) метод характерных рабочих пространств; 3) метод предпочтительной кинематической модели; 4) метод допустимых рабочих пространств. Здесь использован комплексный показатель для оценки пространственного расположения звеньев манипулятора. В формате 3*D* были построены рабочие зоны в программном продукте SimMechanics. Рабочая зона для варианта резки наземного нефтепровода с диаметром трубы 1.2 м приведена на рисунке 3.

Выбранные кинематика манипулятора и размеры звеньев обеспечивают выполнение технологического процесса резки труб нефтепроводов с максимальным диаметром 1.2 мм. При резке прямоугольных сечений нефтехранилищ цилиндрической формы обеспечивается максимальная высота верхней линии резки 3 м с учетом высоты несущей платформы 1.2 м. Для вырезания прямоугольника с размерами 3 м×4 м необходимо переустанавливать транспортную систему или мобильный робот с шагом 1 м.

$$-90^\circ \le \varphi_1 \le 90^\circ$$
$$0^\circ \le \varphi_2 \le 90^\circ$$
$$-90^\circ \le \varphi_3 \le 0^\circ$$
$$-135^\circ \le \varphi_4 \le 135^\circ$$

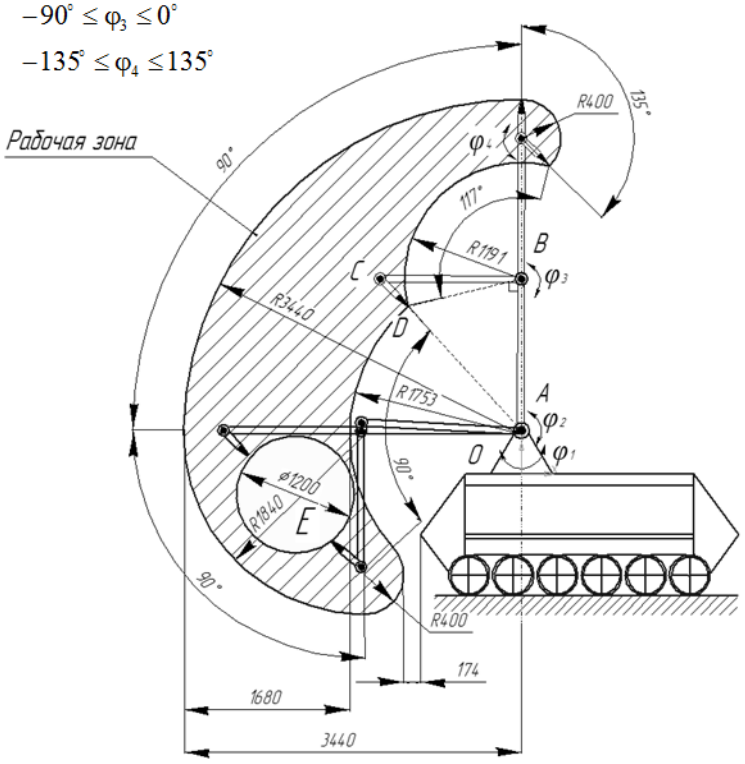


Рисунок 3 – Рабочие зоны мобильного РТК с объектом резания

Алгоритмы управления технологическим роботом

Разработку алгоритмов управления ТР рассмотрим в следующей постановке. Сначала приведем обобщенный алгоритм управления ТР, представляющий собой последовательность выполнения основных операций, выделенных по технологическим признакам (вывод ТР на исходную позицию, движение, поиск определенных условий, вид операции и др.). Затем рассмотрим алгоритмы выполнения процедур и условий обобщенного алгоритма. Блок-схема обобщенного алгоритма приведена на рисунке 4.

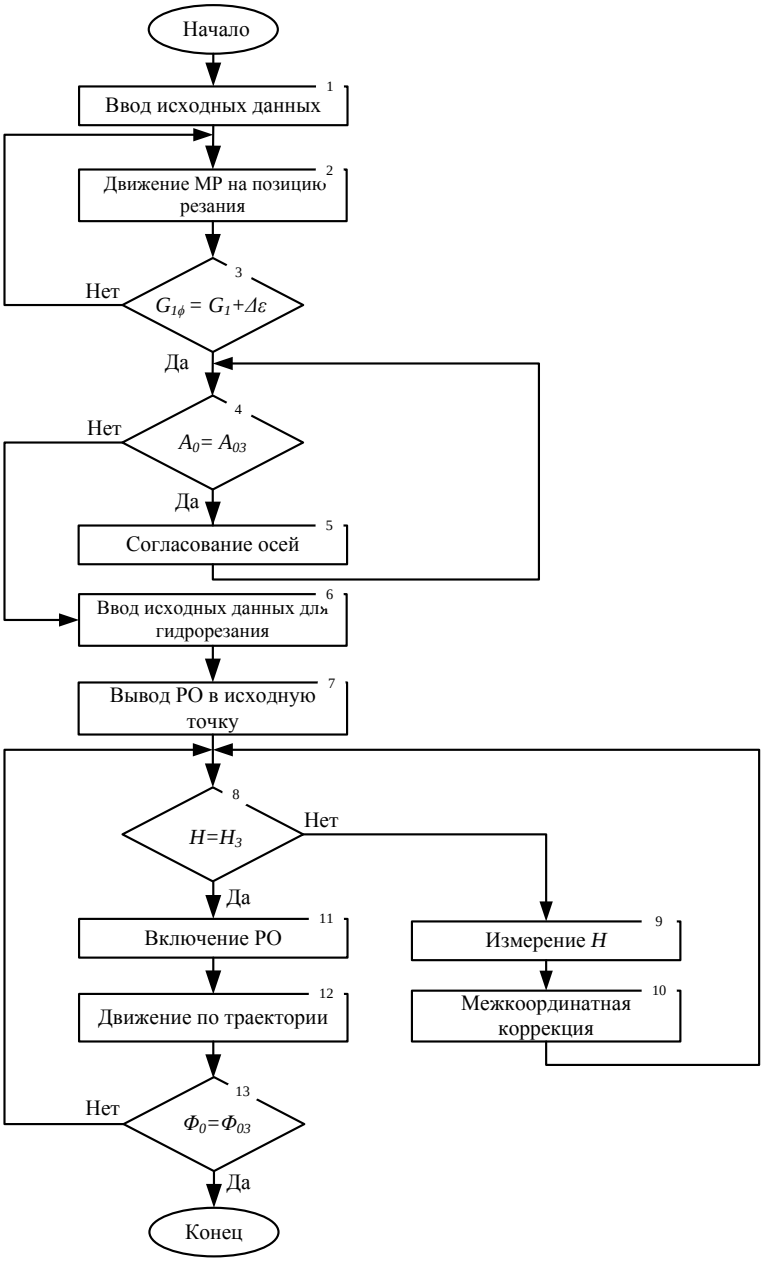


Рисунок 4 – Блок-схема обобщенного алгоритма

Основные процедуры обобщенного алгоритма:

1. Ввод исходных данных для выхода мобильного РТК из исходной точки на позицию выполнения технологической операции (блок 1).

2. Движение РТК из исходной точки на позицию резания (блок 2).

3. Определение фактических координат выхода в исходную точку выполнения технологической операции $G_{1\phi}$ (x_1, y_2, z_3) (блок 4).

4. Согласование систем координат и осей ТР и объекта резания – трубы (блоки 4, 5).

5. Выход в исходную точку и ввод исходных данных для выполнения операции гидроабразивной резки: координаты исходной точки и программа вырезаемого профиля на поверхности трубы (блоки 6, 7).

6. Анализ значения комплексной оценки H, определяющей перпендикулярность оси струи к поверхности резания и расстояние до нее h (блоки 8, 9), и при необходимости ее стабилизация включением алгоритма межкоординатной коррекции (блок 10).

7. Выполняемые процедуры по п. п. 4,5,6 реализованы ниже «своими» алгоритмами. В основу локальных алгоритмов были положены подходы и методика построения алгоритмов позиционно-силового управления при выполнении сборочных работ с использованием метода оценочной функции и алгоритмов адаптивного управления на основе четвертой формы инвариантности [6].

Алгоритм согласования осей технологического робота и объекта включает в себя решение двух взаимосвязанных задач: 1) согласование системы координат объекта (трубопровода) и базовой системы координат манипуляционного робота (системы координат, связанной с основанием манипулятора). Решение данной задачи состоит в определение взаимной ориентации рассматриваемых систем координат, формализованной с помощью системы углов Эйлера: крен, тангаж, рысканье; 2) согласование осей системы координат объекта резания и ввод соответствующих поправок в управляющую программу. Для достижения заданной цели используется поисково-аналитический алгоритм («метод двух сечений») [7]. В основе его лежат поисковые движения с контролем конечных точек на технологической поверхности, фиксации линейных и угловых отклонений координатных осей в плоскости и пространстве. В процессе отработки алгоритма определяются: 1) смещение центра системы координат образующей окружности трубы в сечении, перпендикулярном плоскости манипулятора в точке выхода - Δx, Δz; 2) непараллельность фактической продольной оси трубы относительной расчетной в плоскостях *XOZ, YOZ*, характеризующаяся углами отклонения $\Delta\alpha$, $\Delta\beta$ соответственно. Пояснение принципа действия рассматриваемого алгоритма представлено на рисунке 5.

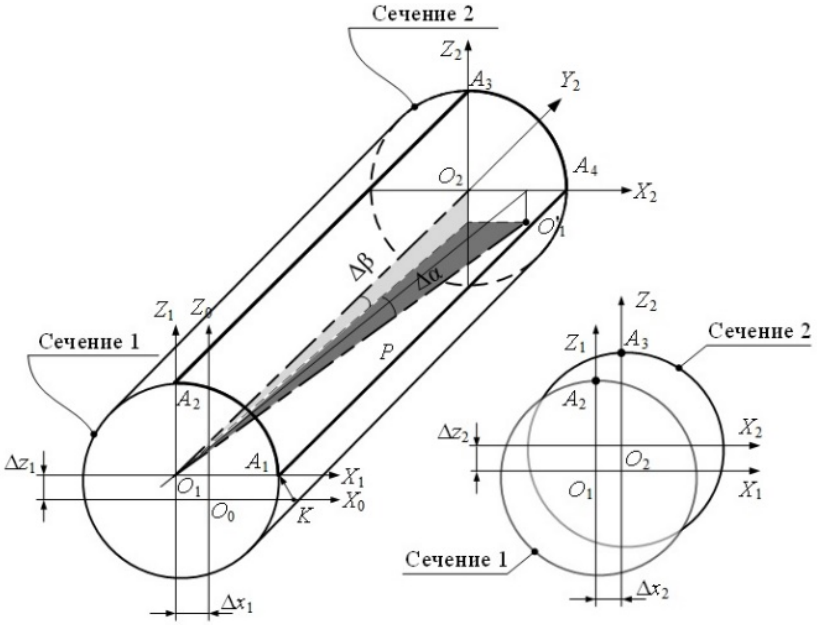


Рисунок 5 – Согласование осей системы координат объекта

Одной из задач при реализации процесса гидрорезания является выход РО в исходную точку по нормали к поверхности. Для выхода РО в любую точку образующей окружности поперечного сечения трубы предлагается использовать алгоритм, в основу которого положен модифицированный метод оценочной функции (ОФ). За эталонную граничную поверхность принимается поверхность трубы по образующей окружности, информационными сигналами для организации перемещения по осям *X, Z* являются сигналы с датчиков измерительной системы, определяющих расстояния l_1, l_2, образующих дифференциальную вилку (измерение по разности двух сигналов). Пояснение к данному алгоритму представлено на рисунке 6.

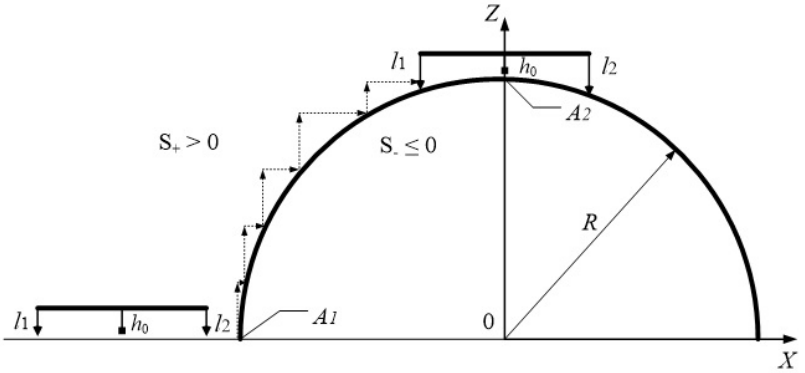


Рисунок 6 – Траектория движения РО при выходе в верхнюю точку объекта

Формирование управляющих воздействий для рассматриваемого квадранта имеет вид:

$$U = U_x \forall S_+; \qquad U = U_z \forall S_-;$$

$$U_x = \begin{cases} V_x \forall (l_2 > h_0) \vee (l_2 < l_1); \\ -V_x \forall (l_2 > h_0) \vee (l_2 > l_1); \\ 0 \forall (l_2 = l_1) \wedge (h = h_0); \end{cases} \qquad U_z = \begin{cases} V_z \forall (l_2 < h_0) \wedge (l_2 < l_1); \\ -V_z \forall (l_2 > h_0) \wedge (l_2 > l_1); \\ 0 \forall (l_2 = l_1) \wedge (h = h_0); \end{cases}$$

Для оценки расположения струи относительно поверхности трубы в точке резания введена комплексная оценка ориентации *H(h,α,β)*. Требуемый набор значений переменных для *H*, удовлетворяющих условию перпендикулярности и требуемому расстоянию h_0, используя символы арифметических и логических операций, запишем в виде:

$$H(h,\alpha,\beta) = \left[(h = h_0) \wedge (\alpha = 90^0) \wedge (\beta = 90^0) \right].$$

При перемещении РО контролируются расстояния l_1, l_2. При их равенстве РО выходит в требуемое положение нормали с расчетным расстоянием среза сопла гидрореза относительно поверхности. Далее выполняется стабилизация расстояния от точки среза сопла до поверхности трубы до значения h_0 по контролю расчетных значений l_1, l_2, которые определяются как:

$$l_{1,2} = \left(h_0 + R\cos\left(\arcsin\frac{l_0}{R} \right) \right),$$

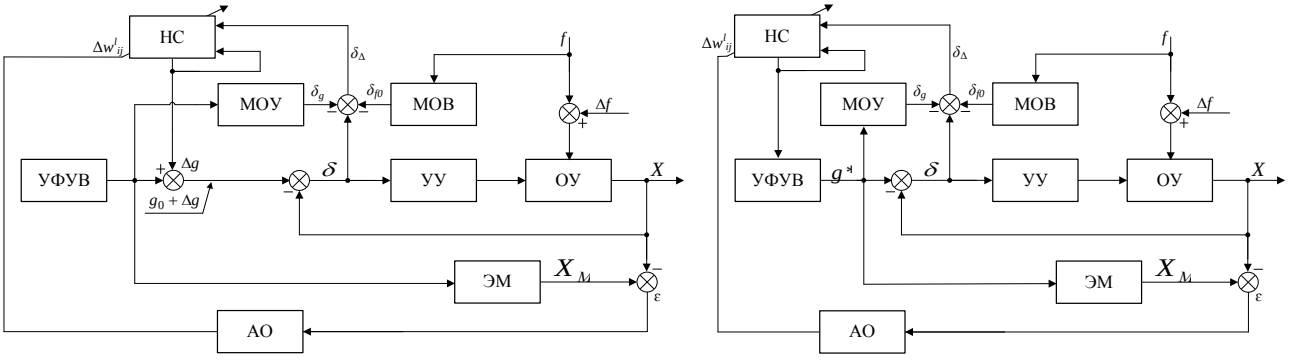
где: R – радиус трубы; l_0 – расстояние от центра штанги (оси сопла) до продольных осей датчиков *BQ1*, *BQ2*. При движении по траектории – образующей дуги окружности автоматически выполняется условие равенства $l_1 = l_2$ и стабилизации h_0.

Межкоординатная коррекция в системе автоматического управления технологическим роботом выполняется в режиме гидроабразивной резки при движении по контуру фигуры резания, в случае деформации поверхности трубы (вмятины, загрязнения, ржавчина и др.). При этом необходимо обеспечить: 1) движение по заданному контуру; 2) перпендикулярность оси струи относительно поверхности резания по двум осям; 3) стабилизацию расстояния от среза сопла до поверхности резания ($h=h_0$) в условиях параметрического возмущения на объект резания. Перпендикулярность расположения струи обеспечивается координатами качания РО в двух плоскостях, перпендикулярных продольной оси звена 4 - $\alpha=90^0$, $\beta=90^0$ (обобщенные координаты q_4, q_5). Отклонение величины расстояния от среза сопла до поверхности резания от номинального значения можно рассматривать как дополнительное, нерасчетное возмущение Δf, которое необходимо парировать введением дополнительного управления Δg_2, Δg_3, Δg_4 по обобщенным координатам q_2, q_3, q_4., т.е. необходимо осуществить переход на новую траекторию.

Для реализации межкоординатной коррекции используются алгоритмы комплементарного управления, основанные на положении модифицированной четверной формы инвариантности [8, 9]. При этом в систему управления вводится контур адаптации, формирующий дополнительную составляющую $\Delta g(p)$ в управляющем воздействии, в функции ошибки от внешнего нерасчетного возмущения $\Delta f(p)$. Для физической реализации формирования $\Delta g(p)$ необходимо выделить составляющую ошибки, пропорциональную $\Delta f(p)$, что реализуется измерительной системой, а также

использованием моделей выделения расчетных ошибок по возмущению. Анализ полученных результатов исследования точности движения РО манипулятора по типовым технологическим траекториям [8, 10] свидетельствует о необходимости включения в контур коррекции звена с переменным коэффициентом передачи, параметры которого зависят от ряда факторов. Данное обстоятельство, а также необходимость учета таких факторов как: сложность математического описания объектов управления (многомерная система с перекрестными связями, наличие упругих деформаций в звеньях, нелинейность механических передач); наличие геометрически-силового взаимодействия соседствующих пар координат кинематической цепи робототехнических устройств, обусловленное инерционными, диссипативными и кориолисовыми силами; неточность базирования объекта манипулирования или неопределенность расположения технологической траектории в пространстве, делают целесообразным применение методов интеллектуального управления при реализации алгоритмов межкоординатной коррекции.

Проведенный анализ структур систем управления с комплементарной коррекцией и метода формирования корректирующих поправок в управляющем воздействии позволяет предложить две схемы включения нейросетевого регулятора в контур системы управления, представленные на рисунке 6 [11]. На схемах обозначено: УФУФ – устройство формирования управляющего воздействия; УУ – устройство управления; ОУ – объект управления; ЭМ – эталонная модель, обладающая заданными динамическими показателями; МОУ – модель ОУ по ошибке от управляющего воздействия; МОВ – модель ОУ по ошибке от возмущающего воздействия. МОВ и МОУ образованы статическими зависимостями первого и второго коэффициентов ошибки от соответствующего воздействия; НС – нейронная сеть; АО – алгоритм обучения, g_0, f – управляющее и возмущающее воздействия соответственно; X, X_M – регулируемая координата и выходная координата эталонной модели соответственно; δ – суммарная ошибка системы; Δf – дополнительное не измеряемое возмущение; δ_{f0}, δ_g – составляющие ошибки системы, обусловленные возмущающим и задающим воздействиями; δ_Δ– составляющая ошибки, пропорциональная дополнительному возмущению; Δg – дополнительная составляющая управляющего воздействия; ε - ошибка между выходной координатой ОУ и ЭМ.



а) б)

Рисунок 6 – Структурные схемы САУ с комплементарной коррекцией и нейросетевым регулятором: а) формирование автономной корректирующей поправки в закон управления; б) коррекция на стадии формирования управляющего воздействия

Входом нейросетевого регулятора служит ошибка, пропорциональная внешнему неопределенному возмущению, выделяемая из суммарной ошибки системы исключением детерминированных составляющих. На выходе регулятора формируется дополнительная составляющая управляющего воздействия в пространстве состояний. Рассматриваемая структура предполагает динамическое обучение нейронной сети в процессе работы. В качестве сигнала ошибки, используемого для настройки весов нейронной сети, предлагается использовать либо суммарную ошибку в контуре системы, либо сигнал рассогласования между выходной координатой эталонной модели и объекта управления (в этом случае необходимо дополнительно включать контур с эталонной моделью, динамические показатели которой отвечают заданным). Цель управления - минимизация ошибки в контуре системы. Здесь полагаются неизвестными поправки закона управления, формируемые в контуре коррекции системы, т.е. отсутствие эталонного значения выходного сигнала нейронной сети.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №18-08-01126 «а».

1. Список стран по длине трубопроводов // Материал из Википедии — свободной энциклопедии. – 2017. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Список_стран_по_длине_трубопроводов.
2. Кобзев А.А., Махфуз А.А., Лекарева А.В. Обоснование и выбор кинематической структуры технологического манипулятора гидрорезания нефтепроводов//Фундаментальные исследования. – 2016. – № 10-1. – С. 53-61. - URL: http://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=40808.
3. Бабич, А.В. Промышленная робототехника / А.В. Бабич, А.Г. Баранов, И.В. Калабин; ред. Я.А. Шифрина. – М.: Машиностроение, 1982. – 415 с.
4. Лукинов, А.П. Проектирование мехатронных и робототехнических устройств. - С.Пб.: Лань, 2012. – 606с. – ISBN 978-5-8114-1166-5.
5. Кобзев А.А., Лекарева А.В. Способ обеспечения нормали рабочего органа технологического манипулятора к поверхности резания // Перспективные технологии в средствах передачи информации: материалы 12-ой международной научно-технической конференции (Россия, г. Суздаль, 5-7 июля 2017 г.). – Владимир: ВлГУ, 2017. – т. II. – С. 193-196. – ISBN: 978-5-905527-16-6.
6. Щипанов Г.В. Теория и методы проектирования автоматических регуляторов // Автоматика и телемеханика. - 1939. - № 3. - С. 25-37.
7. Кобзев А.А. Согласование осей мобильного технологического робота и объекта манипулирования / А.А. Кобзев, А.В. Лекарева // Оборонная техника. – 2015. – №11-12. – С. 201-205.
8. Кобзев А.А. Алгоритмы управления технологическим манипулятором гидрорезания нефтепроводов с учетом специфики выполняемого процесса /А.А. Кобзев, А.В. Лекарева, А.А. Махфуз // Динамика сложных систем - XXI век. - 2016. - № 4. - С. 36-45.
9. Кобзев А.А., Лекарева А.В. Комплементарная коррекция в системах управления движением // Оборонная техника. – 2017. – № 9. – С. 22-29.
10. Кобзев А.А., Новикова Н.А., Лекарева А.В. Исследование методов динамической коррекции управляющего воздействия в приводах технологического робота гидрорезания на основе принципа вложенных контуров // Динамика сложных систем - XXI век. – 2015. – №3, т. 9. – С 14-19.
11. Кобзев А.А., Монахов Ю.М. Лекарева, А.В. Реализация комплементарной коррекции в системах автоматического управления траекторными перемещениями технологических объектов с использованием нейросетевого регулятора // Динамика сложных систем - XXI век. – 2017. – т. 11, № 4. – С. 121-130.

M.B. Ignatiev

NETWORK-CENTRIC CONTROL OF A GROUP OF COMPETING ROBOTS

GUAP, Saint-Petersburg
ignatmb@mail.ru

М.Б. Игнатьев

СЕТЕЦЕНТРИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ГРУППОЙ КОНКУРИРУЮЩИХ РОБОТОВ

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения
ignatmb@mail.ru

Аннотация

Рассматривается групповое управление роботами на основе сетецентрического подхода и лингво-комбинаторного моделирования

Ключевые слова: сетецентрический подход, системы управления, неопределенность, конкуренция, кооперация.

Суть сетецентрического управления заключается в том, чтобы формировать приказы управления роботами с учетом взаимодействия других видов техники и всех данных о конкурирующей группе роботов[1]

Эту методологию можно использовать при управлении группой беспилотников, морскими грузоперевозками и др. на основе лингво-комбинаторного подхода.

Например, для управления четырьмя роботами составляется первое лингвистическое уравнение

$$A1*E1 + A2*E2 + A3*E3 + A4*E4 = 0,$$

где A1 – характеристика робота 1, E1 – приказ об изменении характеристики робота 1, A2 – характеристика робота 2, E2 – приказ об изменении характеристики робота 2, и т.д. и структура эквивалентных уравнений будет иметь вид

$$E1 = U1*A2 + U2*A3 + U3*A4$$
$$E2 = - U1*A1 + U4*A3 + U5*A4$$
$$E3 = - U2*A1 – U4*A2 + U6*A4$$
$$E4 = - U3*A1 – U5*A2 – U6*A3$$

где U1, U2, …, U6 –произвольные коэффициенты, откуда очевидно, что каждый приказ формируется с учетом характеристик всех других платформ и подстраивается с помощью произвольных коэффициентов**.** Если известна информация о конкуренте в виде второго лингвистического уравнения

$$B1*E1 + B2*E2 + B3*E3 + B4*E4 = 0,$$

то структура эквивалентных уравнений будет иметь вид

$$E1 = U1*D^1_{23} + U2*D^1_{24} + U3*D^1_{34}$$
$$E2 = - U1*D^2_{13} – U2*D^2_{14} + U4*D^2_{34}$$
$$E3 = U1*D^3_{12} – U3*D^3_{14} – U4*D^3_{24}$$
$$E4 = U2*D^4_{12} + U3*D^4_{13} + U4*D^4_{23}$$

где D_{23} = A2*B3 – A3*B2 и т.д. , B1- характеристика робота конкурента, противостоящего кораблю A1, B2 – характеристика робота конкурента, противостоящего кораблю A2 и т.д. В этом случаем приказы E1,…,E4 будут вырабатываться с учетом сил конкурентов, а для подстройки используются четыре произвольных коэффициента.

Таким образом выше были продемонстрированы различные варианты использования лингво-комбинаторного подхода для задач синтеза и анализа управления группами роботов и других киберфизических систем.

1. Игнатьев М.Б. Просто кибернетика, СПб, Страта, 2016, -240 с.

M.B. Ignatyev

SYSTEM ANALYSIS OF THE PROBLEMS OF MOVING THROUGH THE SPACES OF THE ARCTIC AND ANTARCTIC

Saint Petersburg state University of aerospace instrumentation, ignatmb@mail.ru

Abstract

The problem of development of polar regions is becoming more and more a priority, but it is difficult to move through the spaces of the Arctic and Antarctic due to polar climatic conditions. The report analyzes various methods of movement in hard conditions, taking into account environmental requirements.

Key words: Arctic and Antarctic exploration, ecological requirements, wheeled vehicles, tracked vehicles, walking machines.

М.Б. Игнатьев

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ПРОБЛЕМ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ПО ПРОСТРАНСТВАМ АРКТИКИ И АНТАРКТИКИ

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения
ignatmb@mail.ru

Аннотация

Проблема освоения полярных областей становится все более приоритетной, но перемещаться по просторам Арктики и Антарктики сложно из-за тяжелых климатических условий. В докладе анализируются различные способы перемещения в суровых условиях с учетом требований экологии.

Ключевые слова: освоение Арктики и Антарктики, экологические требования, колесные машины, гусеничные машины, шагающие роботы.

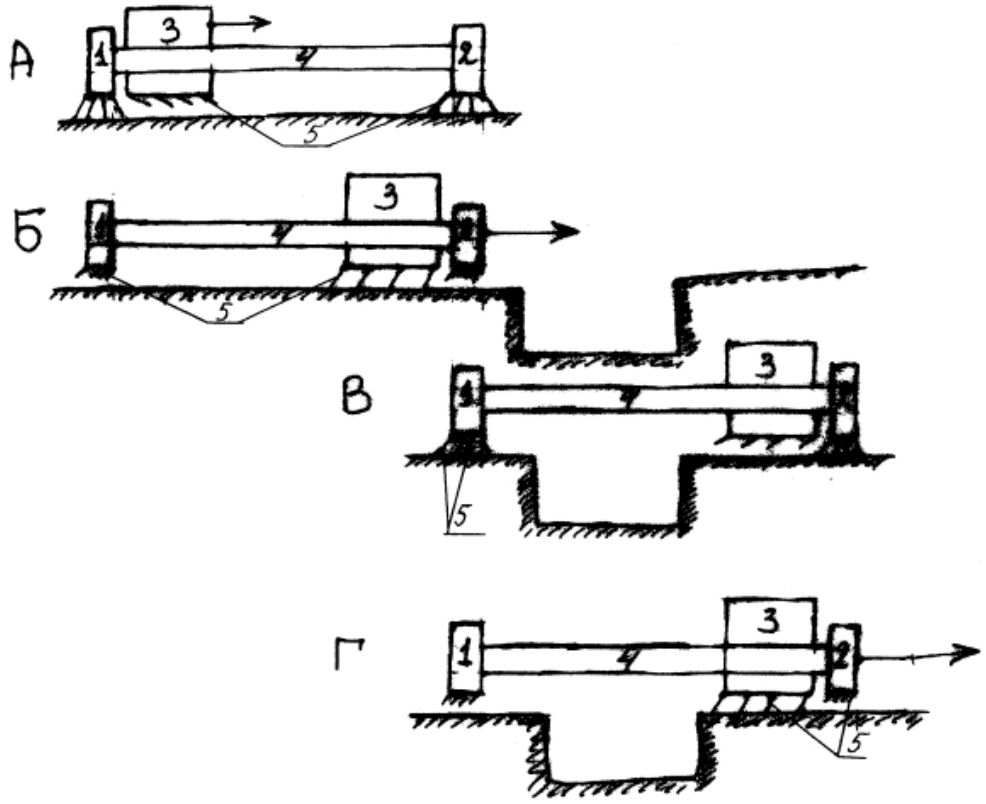
Во многих случаях для перемещения используется шасси колесного типа. Но в ряде случаев оказывается целесообразным использовать шасси с шагающими устройствами. Их конструкции еще далеки от совершенства, но уже можно описать некоторые типы шагающих машин. Выбор оптимальной схемы перемещения для подвижных объектов играет решающую роль в повышении эффективности экспедиций.

Ниже приводится сравнительный анализ трех основных типов движителей: гусеничного, колесного и шагающего.

Для того чтобы выбрать оптимальную схему перемещения, не- обходимо, прежде всего, правильно установить критерии оценки. Оптимальной может считаться схема, позволяющая выполнить поставленную задачу с минимальной затратой энергии. Задачей лю- бого перемещающего устройства является прохождение определенного расстояния для достижения конечной цели вне зависимости от препятствий, встречающихся на пути устройства, и того, будут ли эти препятствия преодолеваться или обходиться[1,3].

Сравнение средств перемещения можно производить по величине энергозатрат, весу и габаритным размерам в зависимости от состояния окружающей среды, несущей способности грунта и размеров препятствий.

Скорость перемещения намеренно не вводится в число параме- тров оценки, так как при перемещении по сильно пересеченной местности скорость колесных и гусеничных устройств снижается на 40–60%, приближаясь, таким образом, к скорости шагающих



ФИГ. 1

Рисунок 1 – Устройство для преодоления препятствий

Изобретение[2] относится к шагающим транспортным средствам повышенной проходимости с движителями-ногами. Шагающее транспортное средство повышенной проходимости с движителями-ногами содержит трубу, на которой смонтированы три платформы. Две платформы неподвижно закреплены на трубе, а одна может перемещаться по трубе. Каждая из платформ снабжена четырьмя механическими ногами с автоматическим приводом и датчиками – визуальными и тактильными и датчиками положения суставов ног для обеспечения устойчивого положения ног на неровной поверхности с возможностью адаптации и изменения положения ног путем переступания. Ноги необходимы для обеспечения устойчивости. Если одна из ног поднята для поиска точки опоры, то три других должны быть расположены так, чтобы проекция центра тяжести системы находилась в треугольнике устойчивости. Достигается повышение устойчивости транспортного средства наряду с переносом значительных грузов при преодолении препятствий на сильно пересеченной местности.

Решение представляет собой шагающее транспортное средство повышенной проходимости с движителями-ногами. Может быть использовано для преодоления препятствий на сильно пересеченной местности, в условиях чрезвычайных ситуаций.

Преодоление препятствий – важная задача, которую необходимо решать при перемещении по пересеченной местности, по зонам разрушений и бедствий.

Существующие транспортные средства – автомобили, гусеничные машины, обычные шагающие машины имеют серьезные ограничения возможностей в преодолении препятствий [1]. При этом использование самолетов и вертолетов не всегда возможно и целесообразно. Предлагаемое устройство существенно пополняет арсенал систем для преодоления препятствий в полярных областях. Следует отметить, что шагающие машины сохраняют растительный покров тундры.

1. Игнатьев М.Б. «Кибернетическая картина мира. Сложные киберфизические системы» изд.ГУАП, С-Петербург, 3-е издание, 2014,-472 с.
2. Игнатьев М.Б., Соколов А.Д. «Устройство для преодоления препятствий», патент на изобретение 2554270.
3. Владимиров С.В., Игнатьев М.Б., Кузьмин Д.В., Сапожников В.И «Робототехнические системы для освоения Арктики» Доклад в Доме ученых им. Горького РАН 26.03.2018.

I.A. Bugakov

MINIMALITY AND CATEGORIZATION PRINCIPLE IN NATURAL AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE

Interregional Social Foundation "Institute of Engineering Physics", Serpukhov, Moscow Region, bia11@mail.ru

И.А. Бугаков

ПРИНЦИП МИНИМАЛЬНОСТИ И КАТЕГОРИЗАЦИЯ В ЕСТЕСТВЕННОМ И ИСКУССТВЕННОМ ИНТЕЛЛЕКТЕ

Межрегиональное общественное учреждение «Институт инженерной физики», г. Серпухов Московской обл., bia11@mail.ru

Аннотация

В статье излагаются обобщенные идеи осуществления процесса категоризации естественным интеллектом воспринимаемых им объектов внешнего мира как прообраза для реализации многомерной категоризации воспринимаемого искусственным интеллектом.

Ключевые слова: выживание, интеллект, восприятие, распознавание, предвидение, категоризация, понимание, минимальность, адаптация, робастность, развитие, филогенез, онтогенез, сознание, базис, сложность, иерархия, сеть, параметры порядка, ассоциация, причинность, эволюционное ускорение.

Основным механизмом выживания большинства природных организмов является предвидение (достоверное прогнозирование), возможность реализации которого является следствием повторяемости (цикличности) природных событий (процессов) и последовательности их наступления, достаточной для практического использования стабильности структур объектов мира и проявляемых ими свойств[2]. Для человека, научно познающего мир, важным для реализации предвидения является существование постигаемой разумом и осознаваемой причинной связи между событиями.

Предвидение базируется на генетическом и индивидуальном опыте, на достижениях филогенеза и дополняющего (и во многом - раскрывающего) его онтогенеза.

Наличие и глубина предвидения определяют наличие и степень развития интеллекта организма.

Реализация предвидения связана с процессами постановки цели, целесообразного восприятия (распознавания), планирования действий и их осуществления с (постоянным) контролем (при необходимости - коррекцией) хода процесса достижения цели. Все это требует от действующего организма наличия «понимания» как способности органично (логично) встраивать свои восприятия, намерения, результаты анализа своих и чужих действий в имеющуюся у него модель мира. Правильность модели позволяет организму выживать и развиваться, вносить свой вклад в дальнейшую эволюцию вида.

Появление сознания с его проявлениями (самоосознание, эмоции и чувства, эмпатия, рефлексия, речь и др.) позволяет живому эффективнее действовать за счет большей глубины предвидения, за счет формирования целесообразных автоматизмов поведения, существенно повышающих оперативность действий и, как следствие, выживаемость. Сознание как инструмент интеллекта, как очередной и наиболее важный контур управления разрешает проблему нарастающей сложности живого в процессе его эволюции.

[2] Большинство из воспринимаемого – ожидаемое.

Процесс категоризации при восприятии живым организмом объектов окружающего мира, как и любые другие реализуемые в живом процессы, подчиняется одному из главных природных принципов – принципу минимальности, в соответствии с которым в процессе видового и индивидуального развития в виде и организме закрепляются те функциональные структуры, которые для выполнения своего предназначения требуют минимальных расходов основных природных ресурсов: пространства, энергии, времени [1]. Идея минимальности и простоты со времен Аристотеля занимает умы исследователей, принимая, начиная с Мопертюи (принцип наименьшего действия), все более четкие очертания. Применительно к «нейронным сетям и категоризации объектов» необходимо указать на «минималисткие вопросы» Н. Хомского [2]: генетическое происхождения базовой языковой структуры («дети везде усваивают любой язык»), необходимость познания физических законов, которые наряду с историческими условиями определяют границы («канал» по Хомскому) создания в живом структур психики, впоследствии подвергаемых естественному отбору - главному исполнительному механизму эволюции.

Все природное существует в том или ином диапазоне условий, выход за который ведет к его пороговому переходу в другое «фазовое» состояние[3]. Эти общие свойства диапазонности существования и пороговости трансформации всех природных объектов позволяют высокоорганизованному живому для восприятия окружающего мира вводить категории как классы понятий, сводя «бесконечное» количество проявлений «вещей в себе» к несколько упрощенному, но достаточному для практического применения конечному количеству классов их описания, что имеет следствием эффективную реализацию распознавания, мышление, способность описания, коммуникацию и пр.

Живое адаптируется к условиям своего существования. Эта адаптация имеет два очевидных уровня: видовой и индивидуальный. Причем видовая составляющая, проявляющаяся в генетических структурах и программах, касается формы, структуры не только внешних органов, их приспособления к выполнению конкретной функции в среде обитания, но и форм мышления, структур мозга. Генетически заданные структуры мозга и их функции любого живого организма максимально приспособлены для жизни в конкретной среде обитания с конкретными, определяемыми возможностями тела, способностями к поведению. Это касается и интеллекта с его априорной адаптацией к реальности, т.к. «наши категории и формы восприятия, зафиксированные *до* индивидуального опыта, адаптированы к внешнему миру в точности по тем же причинам, по которым копыто лошади адаптировано к степному грунту ещё до того, как лошадь рождается, а плавник рыбы – к воде до её появления из икринки» [3]. Мозг при рождении содержит множество готовых робастных систем, точная настройка и достройка которых осуществляется в индивидуальной жизни с учетом ее конкретных нюансов. Степень робастности определяется степенью постоянства условий окружающей среды, в которой эта структура будет работать: чем более постоянны условия, тем точнее настройка (можно сказать, что робастность генетически заданных мозговых структур обратно пропорциональна степени постоянства условий их использования в жизни). Эти системы позволяют нам воспринимать мир в наиболее удобным для выживания виде[4]. Очевидно, что у каждого вида живого свои образы мира и свои категории его описания. Каждый вид имеет свои грани и границы познания «вещей в себе».

Идея робастности исходной генетической структуры с последующей точной ее индивидуальной настройкой (иначе – идея «грубо-точно») как проявление принципа минимальности реализуется в живом на всех уровнях поведения, при совершении любых действий, в том числе и при реализующемся во многом на бессознательном уровне распознавании с ее важным инструментом – категорированием.

Наличие обязательного генетического опыта в объектах с ИИ можно обеспечить двумя путями. Первый - заложить этот опыт при создании объекта с ИИ в виде априорно заданных структур и программ (в том числе для категорирования объектов восприятия). Второй – попытаться вывести требуемую «породу» (вид) объектов с ИИ путем ускоренной эволюции в специальных «эволюционных

[3] Например, вода как жидкость существует в диапазоне температур от 0 до 100 градусов Цельсия, выход за который на обоих краях приводит к новой форме ее организации с новыми свойствами (лед, пар).

[4] Каков мир на «самом деле», не знает никто, кроме Того, кто его создал.

ускорителях» (специализированная среда обитания) с опорой на минимально достаточное количество принципов и ограничений. Второй путь представляется более эффективным, но и более опасным.

Получившие широкое распространение в настоящее время искусственные нейросети (ИНС (в том числе все более набирающего популярность так называемого «глубокого обучения»), широко применяемые в задачах распознавания образов, – всего лишь «геометрические преобразователи», вычислительные алгоритмы, «обучающиеся» локальным обобщениям. У них нет априорной «генетики», решения их необъяснимы, их легко обмануть, они способны на грубые ошибки, переучивание стирает их прежний опыт, для обучения требуется огромное количество примеров. Обученная ИНС реализует, по сути, простейшее поведение: стимул-реакция. К тому же выбор структуры ИНС для реализации желаемой функции осуществляет человек.

«Настоящий» искусственный интеллект (ИИ) - свойство способного к автономному поведению в реальной или виртуальной средах объекта с учетом генетического и индивидуального опыта достоверно предвидеть будущее и на этой основе планировать и реализовывать свое целенаправленное поведение с созданием новых стратегий и алгоритмов (программ). Настоящий ИИ любого уровня «эволюционной» сложности невозможен без придания ему в необходимом объеме того, что в живом именуют психикой и через понимание связывают со способностью воспринимать, запоминать, представлять, предвидеть, воображать и т.д.

Распознавание (на разных уровнях восприятия, обобщения) - ключевая психическая операция. Обращена к опыту (генетическому и (или) индивидуальному), позволяет совершать адекватные ситуации действия, предвидя будущее, планировать поведение, контролировать и корректировать его для достижения цели (как при наличии, так и при отсутствии сознания и связанных с ним состояний и процессов). Базируется на памяти (генетической и индивидуальной), реализуется с обнаружения признаков класса (категории) с последующим их уточнением, идентификацией, запуском целесообразных реакций. В живом реализуется посредством интеграции ощущений через восприятие при задействовании памяти, коры ГМ. Постепенная обработка сенсорных ощущений по мере движения к коре все больше испытывает влияние информации от нее.

Далее приводятся некоторые идеи, рассуждения и выводы (частично повторяющие вышеизложенное) относительно процесса категоризации живым объектов внешнего мира и возможности их использования при создании искусственных систем с «настоящим» ИИ.

1. Восприятие объектов внешнего мира нельзя рассматривать как прием передаваемой информации. В большинстве случаев нам никто ее не отправляет. Мозг сам ее создает, взаимодействуя со средой. Потому каждый «видит» свое, исходя из уровня своего развития, цели, состояния, ценностей и др. Субъективный мир создает нервная система. И именно она решает, что считать полезным сигналом, а что помехой, что является стимулом и знаком, а что нет.

2. Категоризация как принцип и механизм познания, как «упорядочение имеющейся у объекта и поступающей к нему информации» [4] из внешней и (или) внутренней среды - основа восприятия, понимания, механизм придания значения («все воспринимаемое относится к некоторому классу и лишь через него приобретает свое значение» [5, С.14]). Любое восприятие связано с отнесением объекта к той или иной категории, характеризующейся наличием совокупности базисных признаков[5]. «Перцептивное научение состоит в усвоении надлежащих способов кодирования окружающей среды и последующей категоризации доходящих до субъекта раздражителей с помощью кодовых систем» [5, С. 18]. Качество восприятия определяется качеством используемой системы категорий.

3. Базисные признаки, в соответствии с которыми осуществляется категоризация, не всегда совпадают с теми признаками, которые используются при классификации. В отличие от «объективной» классификации как логичной последовательности действий над понятиями категоризация, как известно, не распределяет информацию по заранее созданным пустым классам, а распределяет ее среди уже существующих. Категоризация осуществляется на всех когнитивных уровнях (в том числе – на сенсорном), несет личностный характер, отражает систему ценностей субъекта и потому является подвижной, динамичной. Заметим также, что и в общечеловеческом плане категории также подвижны, отражая в себе не только достижения науки, но и состояние морали.

[5] Здесь и далее под базисом понимается полный набор линейно-независимых элементов, формирующих соответствующее пространство. Идея базиса соответствует принципу минимальности, позволяя создать наиболее экономичное из возможного (в случае использования наиболее подходящих для представления «сигналов» базисов с минимальным количеством членов разложения).

4. При любом восприятии субъект осуществляет категоризацию не по всем, а лишь по части базисных признаков, доставляемых сенсорными сигналами, так что первичное отнесение объекта к той или иной категории осуществляется с той или иной степенью достоверности. После такого первичного отнесения при необходимости в объекте ищутся дополнительные подтверждающие признаки, которые характерны для данной категории и информация о которых хранится в памяти субъекта.

5. Отнесение объекта к той или иной категории «позволяет нам выходить за пределы непосредственно воспринимаемых свойств предмета или события и предсказывать другие, еще не воспринятые свойства данного объекта. Чем адекватнее системы категорий, построенные таким образом для кодирования событий окружающей среды, тем больше возможность предсказания других свойств соответствующего предмета или события» [5, С.22].

6. Каждый объект «мира вещей» имеет бесконечное количество граней своего проявления. При любом взаимодействии с объектом воспринимающему открываются только некоторые из них, познание которых требует отнесение их к соответствующим категориям.

7. Система категорий для любого воспринимаемого объекта имеет иерархически-сетевую структуру). Учитывая целесообразность и ценностную окраску любого восприятия, один и тот же объект в разных ситуациях может быть отнесен к разным категориям, причем сразу к нескольким, расположенным на разных уровнях разных иерархий. То, к какой категории будет отнесен объект при текущем восприятии, какие его свойства-грани будут основными, - зависит, прежде всего, от цели восприятия.

8. Общая модель познанного мира – многомерная пирамида категорий, элемент каждого уровня которой одновременно присутствует в нескольких мерностях, являясь в каждой из них локальной иерархической вершиной, связанной с элементами нижележащего уровня нелинейным преобразованием с использованием обобщенного ряда Фурье. Каждый объект познанного мира есть точка в многомерном пространстве категорий (напомним, что реальное пространство бесконечномерно), базисными элементами которого выступают познанные «линейно-независимые» свойства. Потому главная проблема создания эффективных объектов с ИИ – создание «правильной» иерархически-сетевой системы категорий для конкретной области их применения, что требует формирования категориальных базисов уровней иерархии и разработки их «нелинейной» связи друг с другом как механизма формирования «сложного» из «простого». Напомним (вслед за Розетом [4]), что проблема формирования приемлемых, общепринятых категориальных базисов пока человеком не решена (если базисы цветового или вкусового пространств существуют, то вкусового базиса, насколько известно, пока нет). Заметим также, что и сами категории на любом уровне иерархии в идеальном случае должны формироваться из базисных наборов (непересекающиеся классы у Розета), причем полных.

9. Уровень развития интеллекта субъекта может быть оценен по «ширине», «глубине» и «высоте» используемой им системы категорий. «Ширина» отражает сетевое начало и связана со средним количеством элементов на уровнях иерархии, «глубина» и «высота» отражают иерархическое начало и оцениваются как количество элементов иерархии от среднего, основного (часто называемого базовым[6]) понятия иерархического ряда, причем «глубина» - в сторону уточнения, детализации, «высота» - в сторону обобщения. Следует отметить особую важность обобщения, связывающего частные иерархии между собой и свидетельствующее о все большем восхождении к познанию «истины»[7] («обобщение – сущность познания»).

10. Категоризация ранее часто воспринимаемого осуществляется неосознанно. Категоризация нового базируется на уже существующей системе категорий («младенец, впервые увидевший дождевого червя, называет его мухой: он включает неизвестный объект в имеющийся у него класс, который представляется наиболее подходящим» [4]) с постепенным введением (освоением в процессе обучения), при необходимости, новой категории, встраиваемой в общую систему категорий.

11. Откуда берутся категории? Очевидно, что многие первичные категории, связанные с выживанием («опасно - неопасно», «съедобно – несъедобно», …) должны задаваться генетически и являются врожденными. Остальные формируются в процессе обучения (в том числе – самообучения) с

[6] Базовое – наиболее часто употребляемое в рассматриваемом иерархическом ряду.
[7] Делающей людей свободными.

использованием тех или иных знаковых систем. Знак – результат работы организма по восприятию стимулов.

12. Одной из важных идей синергетики[8] является идея о параметрах порядка, определяющих наступление фазовых переходов (в момент фазового перехода множество параметров состояния системы определяется значениями небольшого количества так называемых «параметров порядка»). Выявление параметров порядка - основа распознавания объекта управления. Точно так же выявление базисных черт воспринимаемого объекта как параметров порядка, как интегрального «ключевого стимула» определяющих его целесообразную для конкретного восприятия сущность, – основа категоризации. Т.е. и формообразование, и когнитивные процессы имеют общую основу.

13. Правильная категориальная база – основа понимания и естественного интеллекта (обучение детей в школе), и интеллекта искусственного. Развитие высокоорганизованного живого как процесс роста величины и адекватности его субъективной модели мира и возможностей действовать в нем отображается в росте его категориальной системы, в ее непрерывном изменении, уточнении, все большем приближении к идеальному (для эффективного действия в данной области) варианту.

14. Непрерывность пространства-времени и причинная связь событий позволяют широко использовать ассоциацию как способ связывания близко расположенных в пространстве и времени объектов восприятия. Ассоциативность реализуется естественным образом - посредством частичного «перекрытия» групп нейронов мозга, «хранящих» различные, но близкие (во времени и (или) пространстве) образы, так что активация одного образа вызывает активацию связанного с ним другого образа как следствие того, что эти группы имеют общие нейроны. Позволяет формировать целостные образы объектов, даже получая сенсорную информацию только по одному из каналов (например, только по зрительному или только по слуховому), поскольку информация этого частного канала по мере продвижения в нервной системе к «центру распознавания» ассоциативно связывается с информацией других каналов восприятия, так что в итоге «центром» воспроизводится не только отдельное ощущение, но и представляется связанный с этим ощущением целостный обобщенный (видовой), а при распознавании «автора» - конкретный образ [6].

В [7…14] изложены концептуальные идеи и конкретные предложения по приданию интеллекта средствам и системам робототехники общего и специального назначения на основе универсальной технологии интеллектуализации, прообразом для которой является природная технология интеллектуализации своих живых созданий, реализуемая в рамках филогенеза и онтогенеза.

1. Бугаков И.А. Принцип минимальности и деятельность мозга. // Сб. научных трудов юбилейного симпозиума, посвященного 150-летию издания «Рефлексов головного мозга» И.М. Сеченова. - М.: ИИнтеЛЛ, 2014. – 432 с., С. 291…316.
2. Хомский Н. О природе и языке: Пер. с англ. – М.: КомКнига, 2005. – 288с.
3. Лоренц К. Кантовская концепция a priori в свете современной биологии. // В книге «Эволюция. Язык. Познание.» (Отв. ред. – д.ф.н. И.П. Меркулов) – М.: Языки русской культуры, 2001.
4. Розов А.И. (Розет И.М.) Проблемы категоризации: теория и практика. // Вопросы психологии, 1986, № 3., С. 90...97.
5. Брунер Дж. Психология познания. За пределами непосредственной информации. Пер. с англ. - М.: Прогресс, 1977. - 413 с.
6. Бугаков И.А., Царьков А.Н. О когнитивном моделировании, искусственном интеллекте и психике роботов. // Известия Института инженерной физики, 2018, № 2.
7. Бугаков И.А. Царьков А.Н. Интеллектуализация военной робототехники: терминологическая и технологическая проблемы. // Известия Института инженерной физики, 2017, № 3, С.87…93.
8. Бугаков И.А. Система принципов построения сложных технических систем и их элементов, подвергающихся экстремальным воздействиям в процессе функционирования, на основе антропологического подхода. // «Датчики и Системы», 2000 г.,№10, С. 67…71.
9. Бугаков И.А. Бугаков А.И., Котов А.А., Умников Е.В., Царьков А.Н. Принцип минимальности и интеллектуализация робототехники: на пути к универсальной технологии. // Материалы Десятой Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления». Ростов-на Дону: Изд-во ЮФУ. 2015, т.2. – 314 с, С.133…146.

[8] Перспективное направление, но, к сожалению, принявшее в качестве исходного положения своих исследований весьма неудачную мысль о так называемой «самоорганизации».

10. Бугаков И.А. Царьков А.Н. Базовая универсальная технология интеллектуализации ВВСТ: концептуальные идеи. // «Известия Института инженерной физики», 2015, № 2, С.65…72.
11. Бугаков И.А. О необходимости разработки методологии, теории и универсальной технологии интеллектуализации робототехники военного и специального назначения. // Труды военно-научной конференции «Роботизация ВС РФ». – М., 2016. – 422с., С. 87…89.
12. Бугаков И.А., Царьков А.Н. Универсальная технология интеллектуализации робототехники: основания интеллектуального поведения. // Материалы Одиннадцатой Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления». – Ростов-на-Дону, Том 2, 2016. – 376с., С. 303…316.
13. Бугаков И.А. Базисный подход как универсальный механизм реализации поведения интеллектуальных антропоморфных роботов. // Сб. трудов участников VI Всероссийской научно-практической конференции «Современное непрерывное образование и инновационное развитие» // Под редакцией проф. А.Н. Царькова и проф. И.А. Бугакова. – Серпухов: МОУ «ИИФ», 2016. – 865 с., С. 135…138.
14. Бугаков И.А., Царьков А.Н. Искусственный интеллект в военной робототехнике: возможности, риски, пути реализации. // Перспективные системы и задачи управления: материалы Двенадцатой Всероссийской научно-практической конференции / Южный федеральный университет. – Ростов-на-Дону: Издательство ЮФУ, 2017. – 580 с., С. 250…260.

E.A. Abrosimov

APPLICATION OF THE FUZZY LOGIC FOR MOBILE ROBOT NAVIGATION IN POORLY DESCRIBED ENVIROMENT

The Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics, St. Petersburg,
e.abrosimov@rtc.ru

Abstract

Most of modern robots need an intelligent control system, especially if they work in a poorly designed environment. The article briefly discusses the main methods used in developing intelligent control systems for mobile robots. The implementation of a fuzzy control system consisting of simple subsystems "Movement towards the goal" and "Obstacle avoiding" is presented. Experimental studies were carried out on the basis of a mobile robot working with ROS. The effectiveness of this approach in a dynamic obstacle environment is shown in comparison with the standard navigation tools ROS in terms of time.

Key words: mobile robots, navigation, control system, fuzzy logic, ROS.

Э.А. Абросимов

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЧЁТКОЙ ЛОГИКИ ДЛЯ НАВИГАЦИИ МОБИЛЬНОГО РОБОТА В ПЛОХО ФОРМАЛИЗУЕМОЙ СРЕДЕ

ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург
e.abrosimov@rtc.ru

Аннотация

Практически все современные роботы нуждаются в интеллектуальной системе управления, особенное если они функционируют в плохо формализуемой среде. В статье произведён краткий обзор основных методов, применяющихся при проектировании интеллектуальных систем управления мобильными роботами. Представлена реализация нечёткой системы управления, состоящей и з простых подсистем «Движение к цели» и «Обход препятствий». Проведены экспериментальные исследования на базе мобильного робота под управлением ROS. Показана эффективность применения данного подхода в среде с динамическими препятствиями по сравнению со стандартными средствами навигации ROS в плане времени.

Ключевые слова: мобильные роботы, навигация, система управления, нечёткая логика, ROS.

Введение

Современные робототехнические средства уже невозможно представить без интеллектуальных систем управления. Многофункциональные робототехнические комплексы под управлением таких систем способны решать широкий круг задач. Они используются в мобильной, сервисной, медицинской, исследовательской, бытовой робототехнике и т.д. Всё, от робота-пылесоса до системы автопилота автомобиля 6-го класса [1], нуждается в интеллектуальной системе управления. Тем более если робот вынужден работать в условиях неполноты знаний об окружающей среде, например, среди динамических препятствий.

Обзор методов создания интеллектуальных систем

Согласно [2] интеллектуальная система содержит в себе:

– проблемно-ориентированную базу знаний (БЗ) в определённой форме представления знаний;

– механизм логического вывода выходных сигналов на основе входных данных и знаний, заложенных в систему;

– механизм обучения или самообучения, позволяющий ее пополнять базу собственных знаний.

В соответствии с этим определением можно выделить несколько ключевых технологий, применяющихся при разработке интеллектуальных систем. Это технология разработки продукционных экспертных систем, создание нечётких логических систем, нейросетевой подход к управлению и создание гибридных интеллектуальных систем [2,3].

В экспертных системах база знаний представляется в виде продукционных правил «ЕСЛИ …, ТО …». Первая обучаемая экспертная система «EURISCO» была разработана Дугласом Ленатом в 80-х. В её основе находятся так называемые «метазнания», позволяющие в процессе обучения формировать новые продукции [4]. Экспертные системы просты и понятны для человека, однако их сложно реализовать при работе с непрерывными сигналами из-за большого числа правил. Поэтому они практически не применяются в современных задачах управления роботами. На смену экспертным системам пришли нечёткие логические системы.

Нечёткие логически системы (НЛС) оперируют не с дискретными значениями «Истина» или «Ложь», а со значением функции принадлежности, которое может принимать любое промежуточное значение [5]. База правил НЛС состоит из лингвистических переменных, значениями которых являются слова естественного языка. Это свойство делает процесс нечёткого вывода прозрачным для понимания человека. Кроме того, НЛС позволяют оперировать с непрерывными сигналами небольшим количеством правил и принимать средневзвешенное решение. Однако в классических нечётких системах невозможно организовать память внутри регулятора и процесс самообучения. В работе [6] разработана НЛС управления мобильным роботом по заданной траектории. В работе [7] представлена реализация простого нечёткого контроллера, позволяющего роботу двигаться к целевой точке с обходом препятствий.

Искусственные нейронные сети (ИНС) представляют собой огромный распределённый процессор, состоящий из элементарных единиц обработки информации – искусственных нейронов [8]. Существует несколько типовых архитектур ИНС: многослойные сети прямого распространения, рекуррентные ИНС, сети Хопфилда, свёрточные сети и т.д. ИНС разных архитектур нашли применение в таких задачах, как: распознавание визуальных образов, детектирование лиц, кластеризация данных и многие другие. Возможность самообучения, работы и интерпретации с непрерывными данными являются важными достоинствами ИНС. К недостаткам ИНС можно отнести большую продолжительность некоторых процессов обучения и частое достижение локального минимума критерия в процессе обучения. В работе [9] применялась ИНС для корректировки рабочей зоны манипулятора в соответствии с заданным критерием качества (скорость, ускорение, энергоёмкость). В работе [10] рассмотрены способы модификации сети Хопфилда для планирования траектории мобильного робота, позволяющие увеличить эффективность работы системы планирования.

Гибридные сети представляют собой структуры, в которых выводы делаются на основе аппарата нечеткой логики, но соответствующие функции принадлежности подстраиваются с использованием алгоритмов обучения нейронных сетей, например, алгоритма обратного распространения ошибки. Такие системы не только используют априорную информацию, но могут приобретать и новые знания. Самой распространённой интегрированной моделью является модель ANFIS (Adaptive Network Fuzzy Inference System) [11].

Кроме того, существуют и другие структуры: FALCON, GARIC, NEFCON. Все они реализуют разные алгоритмы обучения и механизмы логического вывода и применяются в системах автоматического управления. Гибридные сети объединяют все достоинства НЛС и ИНС и являются универсальным средством, но они сложнее в проектировании, обучении при больших размерностях задачи и гораздо более требовательны к вычислительным ресурсам, чем НЛС или ИНС по отдельности.

Исходя из проведённого обзора, было принято решение создавать интеллектуальную систему управления мобильным роботом на базе НЛС. Такая система позволит работать с непрерывными сигналами (расстояние до препятствия, курсовой угол и т.д.), работать в условиях неполноты знаниях об окружающей среде, иметь возможность простой и гибкой настройки и оптимизации за счёт применения лингвистических переменных.

Другой тенденцией в современной робототехнике является применение фреймворка Robot Operating System (ROS) – программной платформы с открытым исходным кодом, облегчающей программирование роботов за счёт реализации распределённых вычислений, быстрого тестирования и огромного набора готовых решений. В частности, ROS уже содержит стек навигации с адаптивной локализацией [12]. Однако нечёткого управления в нём не предусмотрено. Данная работа призвана заполнить этот пробел.

Реализация интеллектуальной системы управления

Нечёткая система состоит из двух подсистем – подсистема «Движение к цели» и подсистема «Обход препятствий». Такая структура позволяет уменьшить общее количество правил в базе, повысить надёжность всей системы и упрощает редактирование каждой подсистемы по отдельности. На рисунке 1 приведены функции принадлежности термов входных переменных подсистемы «Движение к цели». Обе подсистемы в качестве выходных переменных имеют линейную и угловую скорость робота. Поэтому функции принадлежности термов выходных переменных обеих подсистем имеют одинаковый вид, представленный на рисунке 2. Работа подсистемы «Обход препятствий» основана на показаниях лазерного сканирующего дальномера. Дальномер сканирует сектор в 180° перед роботом. Затем данные разбиваются на четыре сектора по 45°, в каждом таком секторе считается среднее расстояние до препятствий. Полученные значения подаются на вход подсистеме «Обход препятствий». Функции принадлежности термов всех четырёх входных переменных имеют одинаковый вид, представленный на рисунке 3.

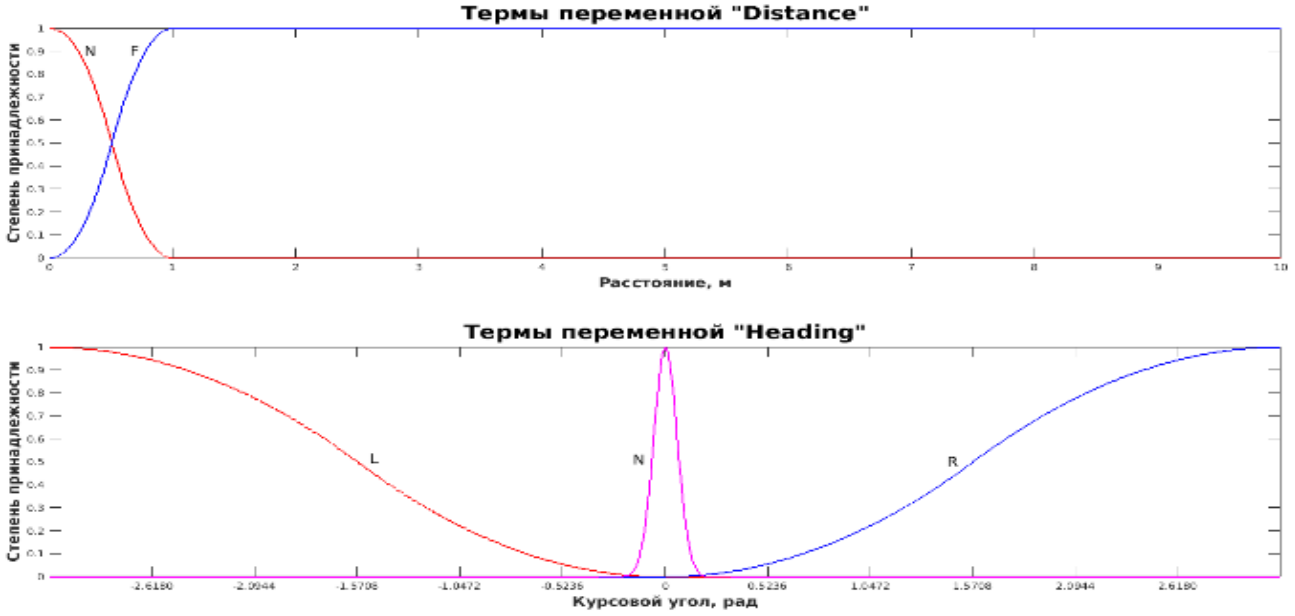


Рисунок 1 – Функции принадлежностей термов входных переменных «Distance» и «Heading» подсистемы «Движение к цели»

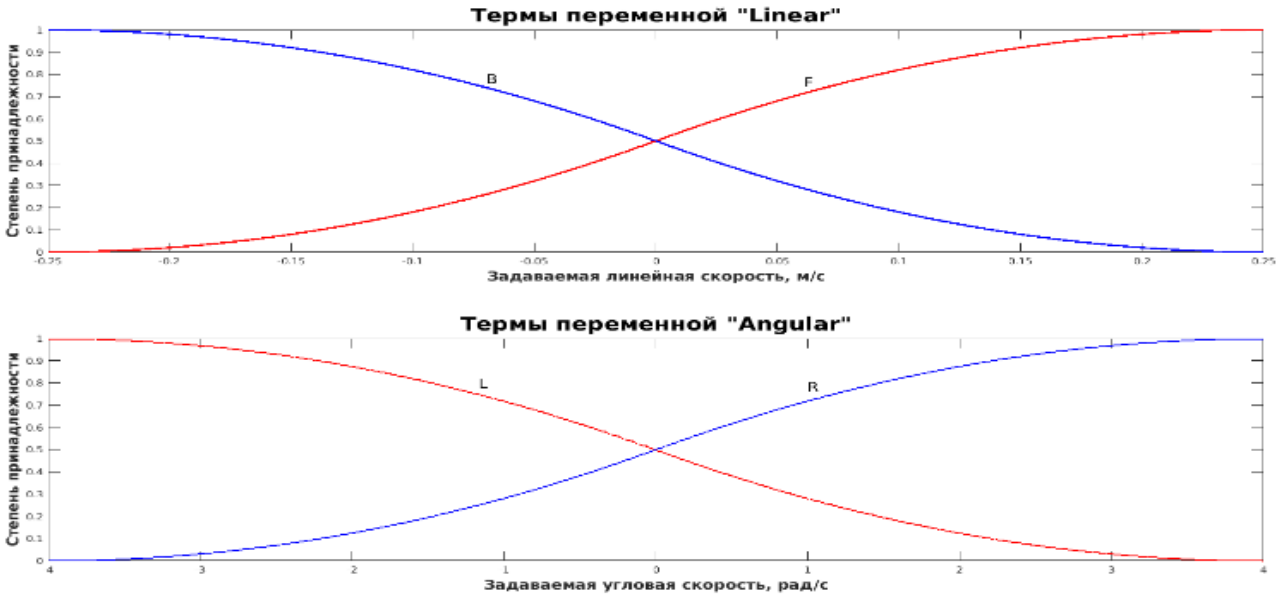


Рисунок 2 – Функции принадлежностей термов выходных переменных «Linear» и «Angular» подсистем «Движение к цели» и «Обход препятствий»

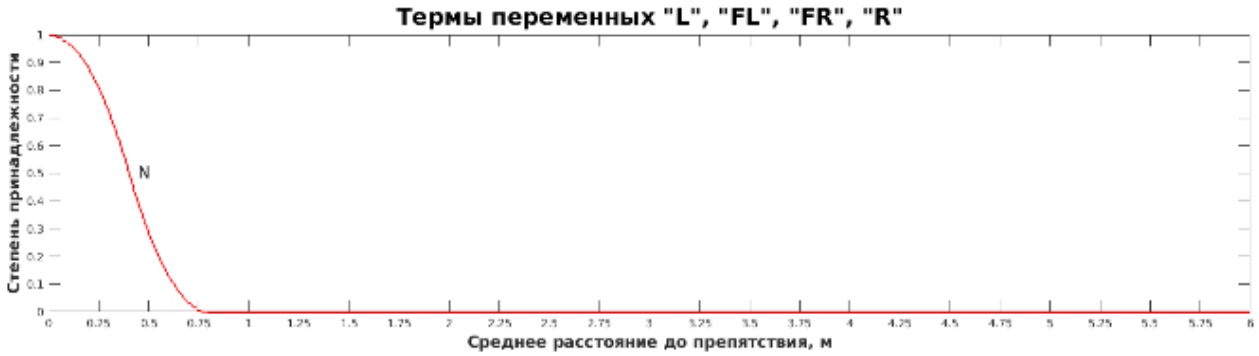


Рисунок 3 – Функции принадлежностей термов входных переменных «L», «FL», «FR», «R» подсистемы «Обход препятствий»

В таблице 1 представлена база правил подсистемы «Движение к цели». Входная переменная «Distance» обозначает расстояние от робота до цели, входная переменная «Heading» обозначает курсовой угол на цель. Значение переменных «N» соответствует терму «близко»; «F» — «далеко»; «L», «R» и «Z» соответственно «влево», «вправо» и «прямо». Выходные переменные «Linear» и «Angular» обозначают соответственно линейную и угловую скорость робота. Значение «Z» соответствует терму «низкая»; «F» — «высокая»; «L» обозначает угловую скорость, направленную против часовой стрелки, а «R» — по часовой.

Таблица 1. База правил подсистемы «Движение к цели»

Входные переменные		**Выходные переменные**	
«Distance»	**«Heading»**	**«Linear»**	**«Angular»**
N	L	Z	L
N	R	Z	R
F	L	Z	L
F	R	Z	R
F	Z	F	—

В таблице 2 представлена база правил подсистемы «Обход препятствий». Входные переменные «L», «FL», «FR» и «R» соответствуют секторам «слева», «спереди слева», «спереди справа» и «справа» от робота. Значение переменных «N» соответствует терму «близко». Выходные переменные имеют тоже значение, что и в подсистеме «Движение к цели», но переменная «Linear» имеет дополнительный терм «B», соответствующий движению назад.

Таблица 2. База правил подсистемы «Обход препятствий»

Входные переменные				**Выходные переменные**	
L	**FL**	**FR**	**R**	**Linear**	**Angular**
N	—	—	—	—	L
—	N	—	—	—	L
—	—	N	—	—	R
—	—	—	N	—	R
N	N	N	—	B	L
—	N	N	N	B	R
—	N	N	—	B	—
N	N	—	—	B	L
—	—	N	N	B	R

Экспериментальные исследования

Эксперимент по сравнению стандартного узла ROS «Move_base» и разработанной нечёткой системы проводился в среде с динамическими препятствиями. Объектом управления служил трёхколёсный мобильный робот, оснащённый лазерным сканирующим дальномером. Робот изображён на рисунке 4.

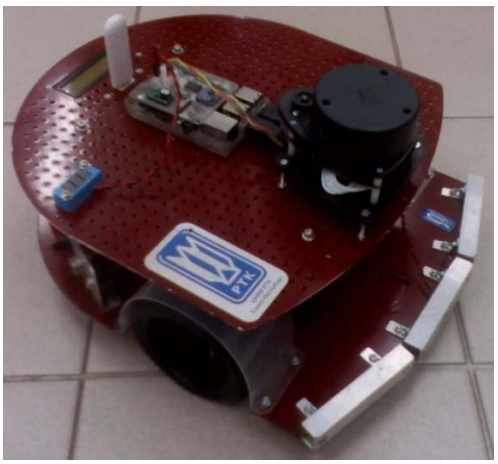


Рисунок 4 – Платформа для проведения экспериментов

Карта помещения, в котором проводился эксперимент, и сама схема эксперимента приведены на рисунке 5. Во время проведения экспериментов параметры робота не менялись.

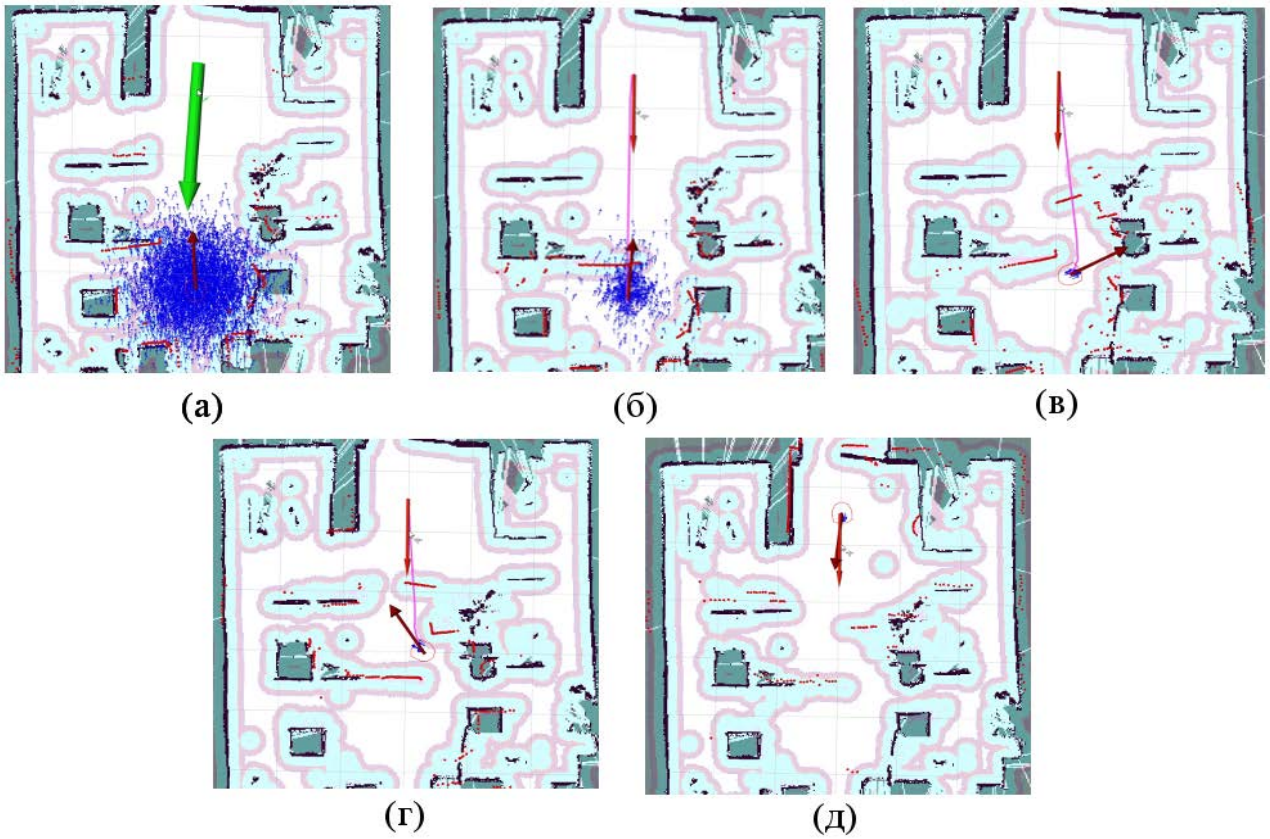


Рисунок 5 – Последовательное проведение эксперимента: установление цели (а), появление первого препятствия (б), появление второго препятствия (в), появление третьего препятствия (г), достижение целевой точки (д)

При движении по траектории измерялись такие параметры, как расстояние до цели, курсовой угол, линейная и угловая скорость. Результаты измерений приведены на рисунке 6.

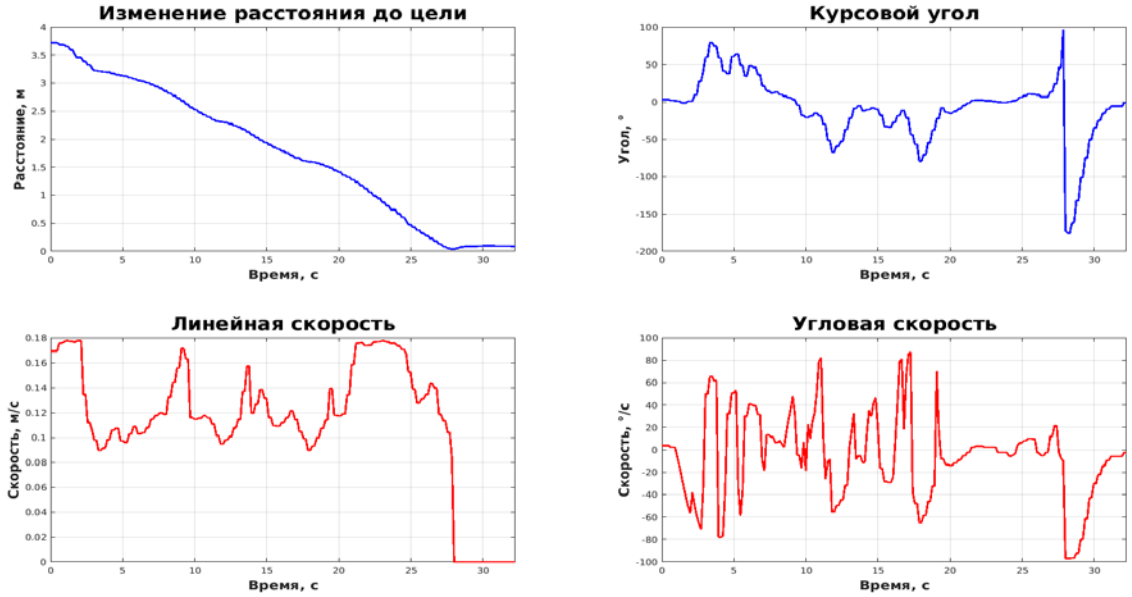


Рисунок 6 – Измерения, полученные в ходе эксперимента с применением нечётких систем

В результате серии проведённых экспериментов разработанная система справлялась с задачей в среднем за 32.3 с, а стандартный узел ROS за 65.7 с. Такая разница обусловлена тем, что в стандартном узле робот постоянно старается очистить вокруг себя карту препятствий и проложить маршрут до целевой точки. В разработанных же НЛС карты стоимости не используются, поэтому

время на их создание и корректировку не тратится. Кроме того, она гораздо проще и понятнее в настройке.

Заключение

В работе реализована НЛС управления мобильным роботом. В результате проведённых экспериментов доказана применимость разработанных НЛС «движение к цели» и «обход препятствий» при движении робота в среде с динамическими препятствиями по известной карте. Разработанная система имеет модульный принцип построения. Удобство такого подхода заключается в простоте независимой модификации различных нечётких систем. Оперирование лингвистическими переменными и прозрачность их значений также способствуют простоте конфигурации и универсальности системы управления мобильным роботом. Результаты экспериментов доказывают, что такая система работает лучше в среде с динамическими препятствиями, чем стандартный узел ROS «Move_base».

1. Официальный сайт сообщества автомобильных инженеров. URL: https://www.sae.org/news/3544 (дата обращения: 30.04.17).
2. Станкевич, Л.А. Представление знаний и интеллектуальные системы: учеб. пособие / Л. А. Станкевич. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2008. – 157 с.
3. Станкевич, Л.А. Интеллектуальные информационные и управляющие системы: учеб. пособие / Л. А. Станкевич. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – 202 с.
4. Lenat, D. EURISKO: A program that learns new heuristics and domain concepts. Artificial Intelligence, 1983, no. 21, pp. 61–98.
5. Леоненков, А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. – СПб. : БХВ Петербург, 2005. – 736 с., ил.
6. Костыгов, А. М., Даденков, Д. А., Каверин, А. А. Нечёткая система управления движением мобильного робота // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 5.
7. Benbouabdallah, K., Qi-dan, Z. A Fuzzy Logic Behavior Architecture Controller for a Mobile Robot Path Planning in Multi-Obstacles Environment. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, 2013, vol. 5, no. 14, pp. 3835–3842. – ISNN: 2040-7459.
8. Хайкин, С. Нейронные сети: полный курс, 2-е издание. : Пер. с англ. – М. : Издательский дом «Вильямс», 2006. - 1104 с. : ил. - Парал. тит. англ.
9. Хапкина, И. К., Балясный, С.В. Методика синтеза системы управления роботом на базе нейронных сетей // Известия Тульского государственного университета. – 2013. – № 9 (1).
10. Юдинцев, Б. С., Даринцев О. В. Модификация нейросетевой системы планирования траекторий: методики и результаты // Фундаментальные исследования. –2014. – № 11 (12).
11. Синюк, В. Г. Гибкие нейро-нечеткие системы вывода и программная реализация для решения задач аппроксимации [Текст] / В. Г. Синюк, Е. Л. Бакшеева // Молодой ученый. — 2014. — № 8. — С. 108-112
12. Dieter Fox, Wolfram Burgardy, Frank Dellaert, Sebastian Thrun. Monte Carlo Localization: Efficient Position Estimation for Mobile Robots. AAAI '99/IAAI '99 Proceedings of the sixteenth national conference on Artificial intelligence and the eleventh Innovative applications of artificial intelligence conference innovative applications of artificial intelligence, pp. 343-349.

A.S. Antonov, D.O. Makarov, B.B. Mikhailov

USING OF INTELLIGENT SENSOR IN A TECHNICAL VISION SYSTEM TO CONTROL PARTS ON A CONVEYOR BELT

Bauman Moscow State Technical University
arty.ant@yandex.ru, dimakk444@gmail.com, borismboris@yandex.ru

А.С. Антонов, Д.О. Макаров, Б.Б. Михайлов

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ДАТЧИКА В СИСТЕМЕ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ДЕТАЛЕЙ НА КОНВЕЙЕРЕ

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва
arty.ant@yandex.ru, dimakk444@gmail.com

Аннотация

В данной работе представлено решение задачи распознавания и определения параметров плоских деталей с помощью интеллектуального датчика, обладающего возможностью обучения с учителем. Датчик представляет собой микрокомпьютер с цифровой видеокамерой и предназначен для использования в гибких робототехнических комплексах. Датчик реализован с применением современных средств программирования сложных систем и использованием фреймворков для высокоуровневого языка Python. В конце статьи приведены результаты экспериментального исследования на реальном оборудовании.

Ключевые слова: система технического зрения, компьютерное зрение, интеллектуальный датчик, микрокомпьютер, ARM, интеллектуальный классификатор, свёрточная нейронная сеть.

Введение

При разработке гибких роботизированных ячеек часто решаются задачи классификации и определения параметров изделий меняющейся номенклатуры. Такие задачи возникают, например, в линиях листовой штамповки, лазерной резки, раскроя деревянных плит. Поскольку в этих линиях детали на листе располагаются так, чтобы максимально заполнить площадь исходного материала, из одного листа получаются детали различного типа. Далее детали поступают на конвейер, где выполняется их сортировка для следующих технологических операций.

Для примера рассмотрим подробнее линию листовой штамповки. Штамповочный пресс вырубает из одного листа множество различных деталей, которые попадают на конвейер с произвольной ориентацией. Все детали должны быть отсортированы по типам. Одним из способов решения данной задачи является создание технологических приспособлений для сортировки, таких как автоматы, матрицы и другой технологической оснастки. Однако, такой метод не позволяет менять номенклатуру деталей, так как требуется перепроектирование оснастки под новые наборы деталей. Для создания гибкой системы сортировки можно использовать манипуляционный робот и систему технического зрения (СТЗ) для классификации деталей. Для захвата робот должен знать координаты детали на конвейере, её ориентацию и тип детали. По этим данным достаточно просто составить программу захвата детали и её перемещения. Координирует действия робота и СТЗ система управления верхнего уровня, которая может быть реализована на контроллере робота или на внешнем компьютере.

Традиционно СТЗ содержит одну или несколько камер, вычислительное устройство для обработки и анализа данных, полученных от камер, и коммуникационное устройство для передачи информации в систему верхнего уровня. Обычно задача получения параметров объектов решается с применением стационарных вычислительных устройств, например, персональных компьютеров (ПК). Компьютер, управляемый операционной системой, позволяет упростить разработку, отладку и процесс эксплуатации системы. Кроме того, использование компьютера обеспечивает гибкость системы, позволяя запускать различные программы управления для разных наборов деталей. Для каждого набора в памяти может храниться несколько программ и баз данных. Весомым преимуществом является простое подключение к компьютеру периферийных устройств (камер, модулей связи), так как под распространённые операционные системы написано множество драйверов к таким устройствам.

Однако, компьютеры, основанные на распространённых процессорах общего назначения, таких серий как Intel Core и AMD Athlon, обладают излишней вычислительной мощностью для данной задачи; использование их только для контроля положения деталей нерационально. Вычислительные устройства на основе ПК требуют наличия множества средств взаимодействия с пользователем, что значительно увеличивает размеры таких систем и их суммарное энергопотребление. Достижения современной микропроцессорной техники позволяют использовать сложные программы на однокристальных системах (SoC – System on Chip), совмещающих в себе вычислительное устройство, память и периферийные модули. Это позволит максимально уменьшить размеры и энергопотребление устройства. Однако разработка программ для таких систем достаточно трудозатратна, так как на микроконтроллерах отсутствуют традиционные операционные системы, и при создании программ приходится реализовывать их элементы самостоятельно. К тому же микроконтроллер должен обладать достаточной производительностью и разрядностью системы для поддержки подобных программ, что сужает область выбора SoC до мощных современных RISC-устройств, например, на основе ядер ARM Cortex.

Решением, объединяющим преимущества персонального компьютера и однокристальной системы, является использование одноплатного микрокомпьютера, оснащённого процессором на ядре ARM. Достоинством данного способа, по сравнению с использованием типовых персональных компьютеров, являются:

– низкая стоимость;

– малое энергопотребление;

– небольшие габариты;

– рациональное использование вычислительной мощности.

Микрокомпьютер обладает следующими достоинствами, по сравнению с использованием однокристальных систем:

– простота программирования и отладки;

– возможность использования высокоуровневых языков программирования (таких как C++, Python);

– поддержка различных коммуникационных интерфейсов;

– универсальность подключения различных видеокамер (не требуется написание драйверов к отдельным устройствам);

– удалённый доступ для изменения задачи (без физического доступа к устройству);

– возможность запуска разных программ обработки данных, предварительно записанных в память.

В данной работе предлагается решение задачи классификации и контроля параметров деталей с применением интеллектуального датчика. Согласно ГОСТ Р 8.673-2009 интеллектуальный датчик проводит обработку полученной с сенсорного устройства информации и выдаёт данные для системы верхнего уровня. Датчик основан на цифровой видеокамере и одноплатном микрокомпьютере. Выходными данными интеллектуального датчика является координаты и ориентации деталей, а также идентификатор конкретного типа детали, позволяющий системе найти деталь в базе данных.

Наличие в микрокомпьютере энергонезависимого запоминающего устройства позволяет хранить в нём базы знаний для каждого конкретного набора деталей. Реализация режима обучения позволяет расширять и корректировать базу знаний без аналитического описания каждой детали. При такой конфигурации платформы можно создать адаптивную систему с элементами интеллектуальности, способную адаптироваться к освещённости, цвету деталей, фильтровать помехи и компенсировать ошибки.

В данной работе в качестве микрокомпьютера используется одноплатный компьютер Raspberry Pi 3 Model B+, оснащённый 64-разрядным микропроцессором Broadcom BCM2837B0 с ядром Cortex-A53 (архитектура ARMv8), обладающим четырьмя вычислительными ядрами частотой 1.4 ГГц.

Схема технологической ячейки

Схема технологической ячейки, в которой установлен интеллектуальный датчик, представлена на рисунке 1. Для сужения круга задач, решаемых в процессе разработки, были введены разумные ограничения на условия работы системы. Пусть датчик будет жёстко закреплён на раме конвейера, при

этом положение рамы определено относительно начала системы координат робота. Конвейер представляет собой подвижную ленту, имеющую достаточно однородную и одноцветную поверхность на всём протяжении.

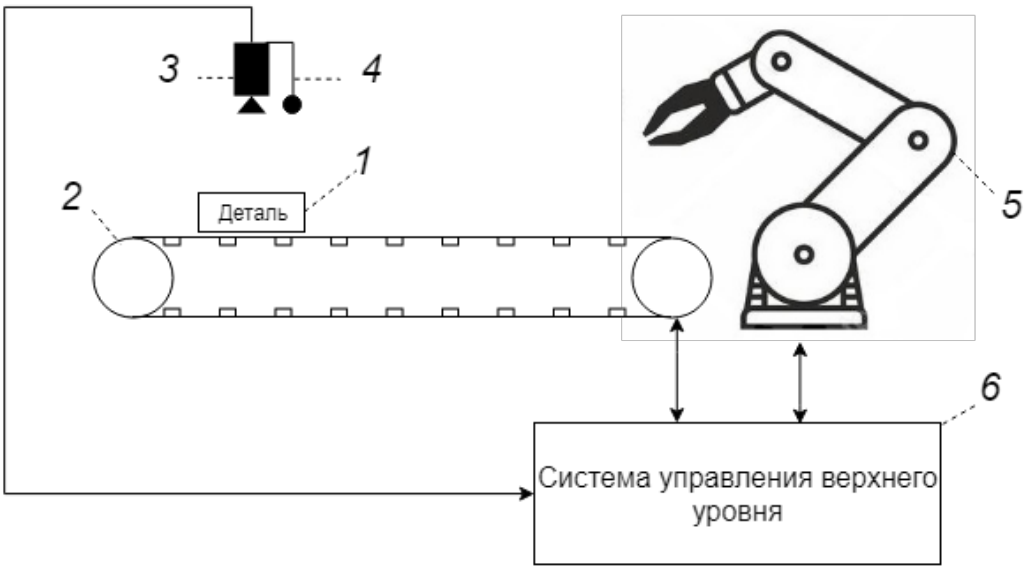


Рисунок 1 – Схема технологической ячейки

Деталь *1* движется на ленте конвейера *2*. Обработка информации происходит при прохождении детали через область захвата изображения камерой интеллектуального датчика *3*. Область освещена закреплённым источником света *4*. После того как деталь покинет рабочую зону датчика, она захватывается манипулятором *5*. Получение информации с датчика и управление манипулятором на её основе осуществляет система управления верхнего уровня *6*.

Схема работы датчика

Схема обработки информации интеллектуальным датчиком представлена на рисунке 2. Камера фиксирует изображение рабочей области и отправляет его на микрокомпьютер. В данной работе используется 8 Мп камера Sony IMX219 Exmor, подключаемая к микрокомпьютеру через интерфейс Camera Serial Interface (CSI) версии 3, поддерживающий передачу данных до 5.8 Гбит/с, что позволяет работать с видеопотоком частотой 30 кадров/с разрешением 1280x720 пикселей. В обычных ПК для подключения камер используется более универсальный интерфейс USB, работающий с меньшими скоростями и требующий программной поддержки.

Далее изображение поступает в систему калибровки. Она отвечает за устранение дисторсий оптической системы камеры, формирует паттерн фона, определяет положение области видимости относительно робота. Это происходит единожды при начале работы системы; в дальнейшем параметры калибровки сохраняются в памяти микрокомпьютера (однократно выполняемые операции указаны штриховыми стрелками).

Постоянное запоминающее устройство в микрокомпьютере представлено картой памяти micro-SDHC (Secure Digital High Capacity), реализованной по технологии флэш-памяти. В отличии от ПК с дисковой памятью, флэш-память имеет более высокую скорость произвольного доступа, но в то же время имеет меньшую ёмкость. В нашем микрокомпьютере используется 32 Гб памяти, что вполне достаточно для хранения множества наборов калибровочных параметров.

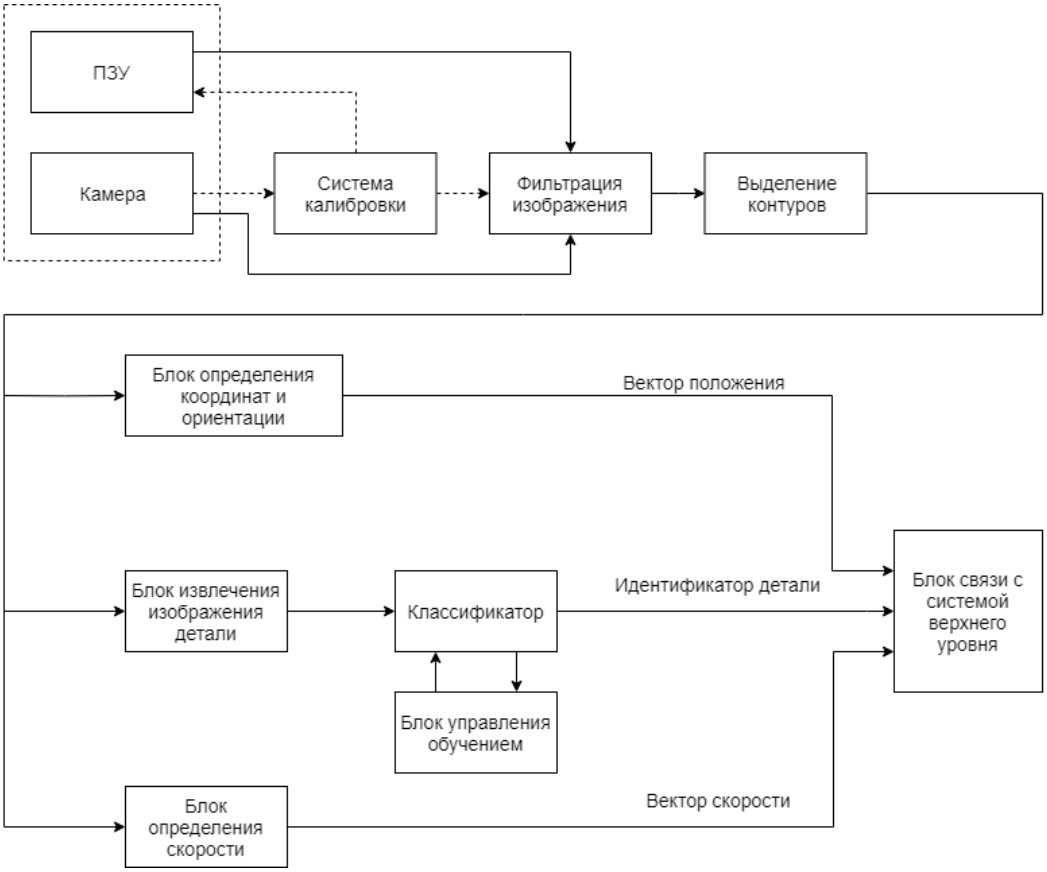


Рисунок 2 – Схема обработки информации

В процессе фильтрации из полученного изображения выделяется область интереса (ROI – Region Of Interest), оставляющая только ленту конвейера в поле зрения. Выполняется предварительная фильтрация изображения, в ходе которой отделяется высокочастотная составляющая, подавляются шумы, и из изображения вычитается паттерн фона.

Далее выделяются контура объектов на изображении. Происходит пороговая фильтрация объектов малых размеров. Также блок выделения контуров занимается детектированием детали в ROI при её появлении на границе изображения.

В результате работы данной части системы получается изображение, на котором уже выделены интересующие нас объекты. Для выделения необходимой информации используются три подсистемы.

Подсистема определения положения занимается нахождением координат центра детали, а также угла поворота её относительно системы координат рабочей области (которая получена на этапе калибровки). Подсистема распознавания обладает интеллектуальными функциями, определяющими, к какому классу принадлежит объект и предоставляющими возможность обучения классификатора. Подсистема определения скорости деталей работает с видеопотоком, определяет разность между положениями детали в различные моменты времени и вычисляет скорость детали.

Полученная информация объединяется в единый вектор, который отправляется в систему управления верхнего уровня. Микрокомпьютер имеет встроенный интерфейс Ethernet, позволяющий взаимодействовать с большинством современных сетевых устройств. Интерфейс поддерживает технологию PoE (Power over Ethernet), позволяющую подводить источник питания вместе с коммуникационными линиями. Дополнительно плата микрокомпьютера оборудована двухдиапазонным адаптером (2,4/5 ГГц) беспроводной связи Wi-Fi с поддержкой стандартов IEEE 802.11b/g/n/ac и контроллером Bluetooth 4.2/LE.

Калибровка

Датчик зафиксирован неподвижно над лентой конвейера. Это позволяет провести калибровку один раз, сохранив параметры в памяти устройства. В результате калибровки датчик вычисляет коэффициенты, компенсирующие аберрацию изображения, а также определяет координаты области

видимости относительно рамы конвейера, что в дальнейшем используется для пересчёта координат деталей относительно робота.

Камера не идеальна, она искажает геометрическую форму объекта и нуждается в предварительной калибровке. Чтобы использовать камеру для измерения координат, необходимо устранить эти геометрические искажения. Калибровка камеры осуществляется с целью определить её внутренние параметры, а именно — матрицу преобразования и коэффициенты дисторсии [1].

Точность измерения параметров камеры (коэффициенты дисторсии, матрица камеры) определяется средней величиной ошибки перепроецирования (ReEr – Reprojection Error). ReEr — расстояние (в пикселях) между проекцией P' на плоскость изображения точки P на поверхности объекта, и проекцией P" этой же точки P, построенной после устранения дисторсии с использованием параметров камеры.

Для калибровки камеры на ленте конвейера была использована «шахматная доска». На изображении определяются ключевые точки, затем рассчитываются такие коэффициенты дисторсии, которые минимизируют ReEr. В нашем случае, среднее значение ReEr составило 0.3 пикселя.

Также в процессе калибровки был сформирован паттерн фона. Были сняты 12000 кадров ленты конвейера в движении, затем был рассчитано усреднённое изображение, которое и является паттерном фона. К паттерну в дальнейшем применяются те же методы фильтрации, что и к изображению.

Выделение объектов на изображении

Обычно алгоритмы распознавания изображений основаны на выделении морфологических особенностей объектов и дальнейшем вероятностном поиске полученных особенностей в базе знаний. Алгоритмы такого типа требуют точного выделения объекта из общего изображения, при этом контур изображения должен быть неразрывным, внутри контура должны отсутствовать пустоты. Существует множество способов решения данной задачи [2]. Однако в данной работе используется интеллектуальный классификатор, на вход которого передаётся изображение объекта в том виде, в котором оно получено с камеры. Достаточно вписать рассматриваемый объект в геометрическую фигуру заранее известной формы (например, круг или прямоугольник), выделить фигуру с изображением объекта и отправить в классификатор на распознание. Для поиска координат и ориентации объекта достаточно (в рамках данной работы) определить координаты центра описываемой фигуры и её поворот относительно неподвижной системы координат, связанной с рабочей областью камеры.

Таким образом, достаточно использовать один из алгоритмов выделения контуров и их последующего замыкания. Полученный набор замкнутых контуров фильтруется по минимальному значению габаритов контура, оставшиеся контура вписываются в прямоугольники равного размера. Эти прямоугольники содержат изображения отдельных объектов, которые выделяются из общего изображения рабочей области и далее обрабатываются классификатором.

В качестве алгоритма выделения границ был использован детектор границ Кэнни. Вначале происходит размытие изображения для удаления шума и вычитание из него паттерна фона. Оператор Кэнни использует фильтр, который может быть хорошо приближен к первой производной гауссианы. Далее выполняется поиск градиентов. Границы отмечаются там, где градиент изображения приобретает максимальное значение. Они могут иметь различное направление, поэтому алгоритм Кэнни использует четыре фильтра для обнаружения горизонтальных, вертикальных и диагональных ребер в размытом изображении. Затем происходит подавление локальных максимумов и двойная пороговая фильтрация. Итоговые границы определяются путём подавления всех краёв, не связанных с определёнными (сильными) границами. Полученные границы замыкаются в контура. Выделение объектов реализуется итерационным алгоритмом вписания границ в прямоугольники. На рисунке 3 представлен набор деталей в процессе поиска границ и после их выделения из общего изображения.

Обработка изображения выполняется с помощью графического ядра VideoCore IV с частотой 300 МГц, интегрированного в микропроцессор BCM2837 датчика, что позволяет ускорить вычисления за счёт параллельной обработки видеопотока на массиве GPU. На ПК данная возможность предоставляется дискретными графическими картами, однако в последнее время развиваются интегрированные графические сопроцессоры, встраиваемые в CPU компьютеров. Видеокарты на ПК обладают высокой производительностью, однако, для задач СТЗ хватает встроенного графического ядра.

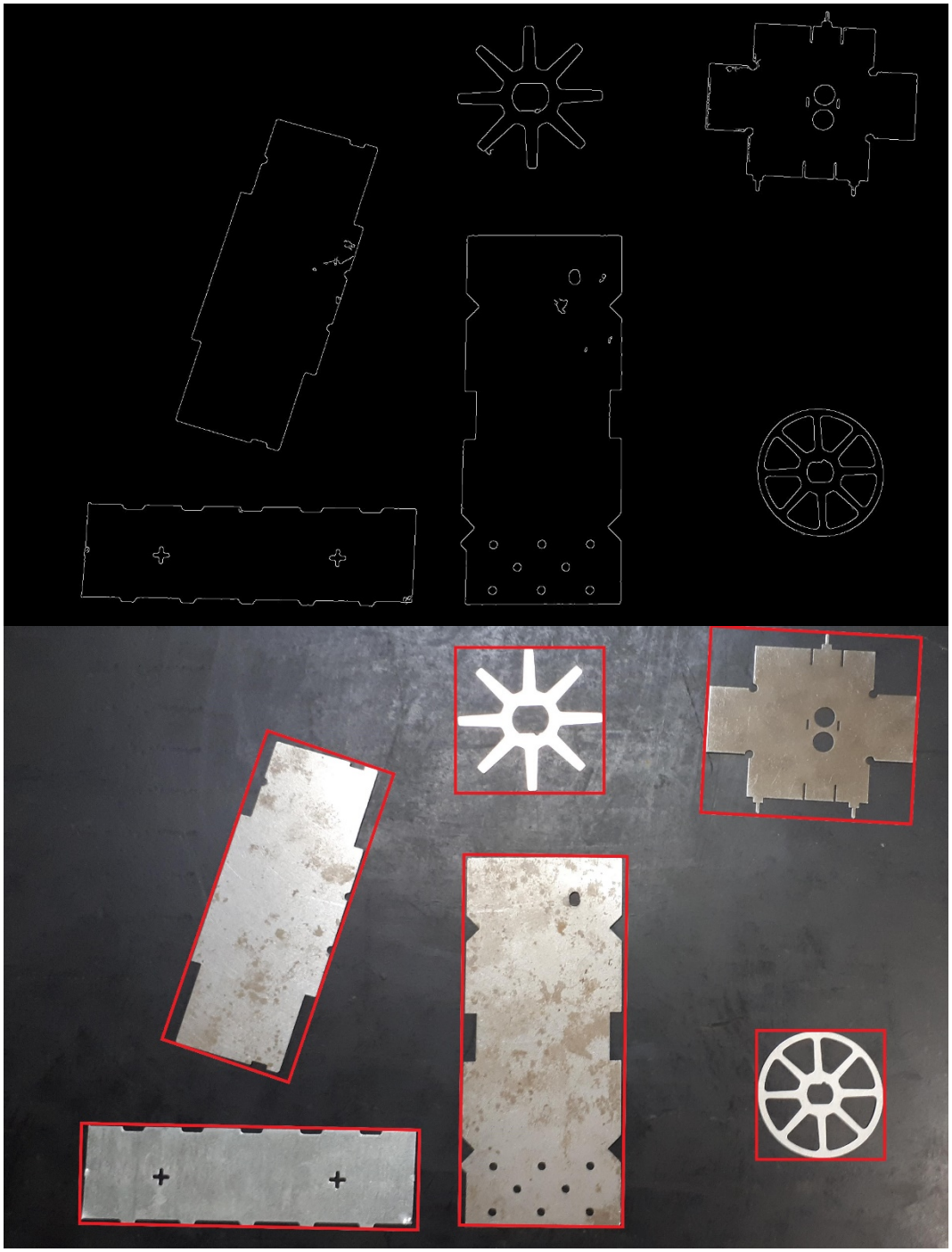


Рисунок 3 – Границы деталей, определённые детектором Кэнни; найденные детали на общем изображении рабочей области

Полученные области расположения объектов извлекаются из исходного изображения и отправляются на вход классификатора.

Описание классификатора

Наилучшие результаты в области распознавания образов показала Convolutional Neural Network или свёрточная нейронная сеть (далее – СНС). Свёрточные нейронные сети обеспечивают частичную устойчивость к изменениям масштаба, смещениям, поворотам, смене ракурса и прочим искажениям изображения объекта. Свёрточные нейронные сети объединяют три архитектурных идеи:

– локальные рецепторные поля (обеспечивают локальную двумерную связность нейронов);

– общие синаптические коэффициенты (обеспечивают детектирование некоторых черт в любом месте изображения и уменьшают общее число весовых коэффициентов);

– иерархическая организация с пространственными подвыборками.

– На данный момент свёрточная нейронная сеть и ее модификации считаются лучшими по точности и скорости алгоритмами нахождения объектов на сцене [3].

СНС состоит из слоев разных видов: свёрточные (convolutional), субдискретизирующие (subsampling, подвыборка) и слои «обычной» нейронной сети – персептрона.

Входные данные представляют из себя цветные изображения типа JPEG, выделенные на предыдущем этапе, размером 255x125 пикселей.

Свёрточный слой представляет из себя набор карт признаков; у каждой карты есть синаптическое ядро размера 5x5 пикселей. Ядро представляет собой систему разделяемых весов или синапсов. Это одна из главных особенностей свёрточной нейросети. В обычной многослойной сети очень много связей между нейронами, что весьма замедляет процесс детектирования. В свёрточной сети – наоборот: общие веса позволяют сократить число связей, находить один и тот же признак по всей области изображения. Ядро реализует фильтр-идентификатор свойства – горизонтальные, вертикальные, диагональные линии и кривые. В нашем случае достаточно двух свёрточных слоёв, так как детали представляют собой комбинации простых геометрических фигур. На первом слое выделяются линии, на втором – фигуры.

Последний из типов слоев это слой обычного многослойного перцептрона (MLP – Multi-layer perceptron). После свёрточных слоёв мы получаем множество карт признаков. Они соединяются в один вектор и этот вектор подаётся на вход MLP. Перцептрон состоит из входного слоя, одного скрытого и одного выходного слоя. Нейроны каждой карты предыдущего подвыборочного слоя связаны с одним нейроном входного слоя. Выходной слой связан со всеми нейронами предыдущего слоя. Количество нейронов выходного слоя соответствует количеству распознаваемых типов деталей.

Классический алгоритм обратного распространения ошибки хорошо работает на двухслойных и трехслойных нейронных сетях. Обучение нейронной сети сводится к минимизации функции ошибки, путем корректировки весовых коэффициентов синаптических связей между нейронами. Под функцией ошибки здесь понимается разность между полученным ответом и желаемым.

Как и все ядра ARM серии Cortex, ядро Cortex-A53 поддерживает стандарт CMSIS (Cortex Microcontroller Software Interface Standard), предоставляющий библиотеку CMSIS-NN (Neural Networks). Данная библиотека реализует аппаратную поддержку нейросетевых алгоритмов на ядрах Cortex, что увеличивает эффективность вычислений и уменьшает объём используемой оперативной памяти.

Реализация

Код программы для датчика был написан на языке Python с использованием таких библиотек, как NumPy, Sys. Наша задача заключалась в реализации описанной системы на микрокомпьютере, поэтому мы воспользовались готовым набором алгоритмов обработки изображения, реализованным в библиотеке OpenCV. Подробное описание библиотеки приведено в [4].

Для реализации работы с камерой используется модуль picamera. Существует два стандартных инструмента для работы с камерой: raspivid и raspistill, позволяющие фиксировать фото и видеопоток соответственно. Модуль позволяет работать с графическими эффектами и общими параметрами камеры. Предварительно настраивается баланс белого, фокусировка, экспозиция, ISO. В нашем случае изображение записывается в grayscale-диапазоне (только сигнал яркости).

Дальнейшая обработка проводится с помощью модуля OpenCV_Core. Модуль реализует размытие по Гауссу, выделение границ детектором Кэнни, их уточнение, вписывание объектов и выделение их в отдельные изображения.

Классификатор реализован с помощью фреймворка Keras [5]. Фреймворк был настроен на параллельную обработку четырёх образцов, размер ядра сети был задан равным 5x5, количество нейронов в слое MLP – 12, глубина сети – 3 слоя. Параметры выбраны эвристически, их дальнейшая коррекция зависит от результатов обучения сети и качества её работы. Верхний предел ограничен лишь вычислительными возможностями микрокомпьютера.

Обучение и тестирование интеллектуального датчика

В нашем распоряжении имелся ленточный конвейер, приводимый в движение асинхронным электродвигателем, управляемым преобразователем частоты. Рядом с конвейером установлен робот Fanuc CR-35iA. Внешний вид оборудования представлен на рисунке 4.

Рисунок 4 – Конвейер с роботом

Над конвейером был зафиксирован датчик с источником света. Была проведена настройка параметров камеры и калибровка рабочей области. К микрокомпьютеру был подключен дисплей для мониторинга процесса работы программы и обучения нейросети.

По конвейеру передвигались 10 деталей различных типов, при этом скорость конвейера составила 10% от максимальной (примерно 0.1 м/с). Во время первых десяти прогонов оператор обучал систему каждой детали, при этом уже на четвёртой итерации система стала успешно распознавать одну из деталей. После обучения на тестовой выборке были добавлены ещё три детали, а уже имеющиеся перемешаны и заново разложены на ленте. За 40 тестовых прогонов система успешно распознала тип детали в 79% случаев, при этом ошибочно отнесены к другому типу 9% известных деталей и 5% неизвестных деталей, а в 7% случаев система относила деталь к нескольким типам одновременно.

Такое качество работы обусловлено недостаточным количеством деталей в обучающей выборке. Однако система подтвердила возможность успешной реализации интеллектуального датчика на базе микрокомпьютера, так как его вычислительных возможностей было достаточно для выполнения данной задачи. Пиковая нагрузка на центральный процессор составила 100% производительности, в среднем каждое ядро было загружено на 80%. Максимальное энергопотребление системы составило 10 Вт.

Заключение

Прототип подтвердил возможность создания СТЗ с элементами искусственного интеллекта на выбранной аппаратной платформе. Применение подобных систем в гибких робототехнических комплексах позволит существенно расширить их функциональные возможности.

1. Z. Zhang, «A flexible new technique for camera calibration», IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.22, No.11, 2000.
2. Нгуен К.М. Методы и алгоритмы обработки изображений в системах технического зрения промышленных робототехнических комплексов: дис. … канд. техн. наук. М., 2015. 136 с.
3. Michael A. Nielsen, "Neural Networks and Deep Learning", Determination Press, 2015.
4. Open Source Computer Vision Library. URL: https://opencv.org
5. Keras: The Python Deep Learning library. URL: https://keras.io

A.V. Bakhshiev, S.R. Orlova, A. Komarov, D.N. Stepanov

CLASSIFICATION OF SCENARIOS AND ALGORITHMS IN TECHNICAL VISION SYSTEMS OF UNMANNED GROUND VEHICLES

Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics, Saint-Petersburg
alexab@rtc.ru, s.orlova@rtc.ru, dnstepanov@rtc.ru

Abstract

At present, one of the important trends in the development of science and technology is the desire to automate everyday human activities, especially related to prolonged mental or physical exertion, resulting in impaired concentration and fatigue. One of the needs of the modern human is the need for rapid and safe movement. In this regard it is important to create driver assistance systems that monitor the traffic situation, detect people and obstacles, and provide information and warning messages to the driver, as well as recommendations for maneuvers.

In accordance with the specifics of the environment, the speed of the vehicle, the types of obstacles and the degree of determinism of situations, the following list of scenarios for the use of the system can be defined, for example: highway traffic; traffic on a city road; movement along the territory and parking; navigating through intersections.

Each of these scenarios involves the execution of some set of technological operations (TOP).

Examples of such technological operations are improving the quality of the image in poor visibility conditions; using of the surround vision monitoring system providing information about obstacles, traffic objects and the parameters of their relative movement; tracking lanes, maintaining a safe following distance and applying emergency brake; the possibility of overtaking; definition of requirements for traffic parameters of the vehicle in accordance with information from the elements of the road infrastructure (signs, traffic lights).

To ensure the fulfillment of these technological operations, it is necessary to develop algorithms based on deep neural networks (primary detection of the local objects such as road signs, cars, people), methods of invariant tracking based on optical flows, methods of extended object tracking, etc.

At the same time, an important aspect is the integration of data and the construction of motion models for observable objects, as well as an advanced decision-making system.

Key words: autonomous driving, computer vision, object detection, tracking.

А.В. Бахшиев, С.Р. Орлова, А. Комаров, Д.Н. Степанов

КЛАССИФИКАЦИЯ СЦЕНАРИЕВ И АЛГОРИТМОВ В СИСТЕМАХ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург
alexab@rtc.ru, s.orlova@rtc.ru, dnstepanov@rtc.ru

Аннотация

В настоящее время одной из важных тенденций развития науки и техники является стремление автоматизировать повседневные действия человека, особенно связанные с повышенной концентрацией внимания и высокой утомляемостью. Одной из потребностей современного человека является необходимость быстрого и безопасного передвижения. В этом направлении актуально создание систем помощи водителю транспортного средства, контролирующих дорожную обстановку, обеспечивающих обнаружение людей и препятствий, и выдачу информационных и предупреждающих сообщений водителю, а также рекомендаций по совершению маневров.

В соответствии с особенностями окружающей обстановки, скоростями движения ТС, типами препятствий и степенью детерминированности ситуаций может быть определен следующий перечень сценариев использования, например: движение по магистрали; движение по городской улице; проезд перекрестка и парковка.

Каждый из этих сценариев подразумевает выполнение некоторого набора технологических операций (ТОП) которыми, к примеру, являются: повышение качества изображения в условиях плохой

видимости; формирование области кругового обзора вокруг транспортного средства с информацией о препятствиях, объектах дорожного движения и параметрах их относительного движения; отслеживание полосы движения, удержание дистанции и принятие решения о торможении; определение возможности перестроения и обгона; определение требований к параметрам движения ТС в соответствии с информацией от элементов дорожной инфраструктуры.

Для обеспечения выполнения этих технологических операций необходимо разработать алгоритмы, в основу которых могут быть положены глубокие нейронные сети (первичное обнаружение локальных объектов, таких как дорожные знаки, автомобили, люди), методы инвариантного сопровождения, базирующиеся на оптических потоках, методы поиска протяженных объектов и др.

При этом важным аспектом является комплексирование данных и построение моделей движения наблюдаемых объектов, а также развитая система принятия решений.

Ключевые слова: автономное вождение, техническое зрение, обнаружение объектов, сопровождение, классификация ситуаций.

Введение

Создание автономных транспортных средств – по-прежнему вызов современным решениям в области технического зрения, навигации и управления.

Всего существует 6 уровней автоматизации автомобилей в стандартной классификации, разработанной сообществом автомобильных инженеров (SAE) [1]:

0. Система автономного управления полностью отсутствует, но может присутствовать система уведомлений.

1. Система автоматизированного управления с ограниченными функциями, таким как: круиз-контроль, автоматическая парковочная система и система предупреждения о сходе с полосы. Водитель должен быть готов в любой момент взять управление на себя.

2. Система автоматизированного управления дополнительно управляет ускорением, торможением и рулением, и может быть отключена пользователем. Водитель должен реагировать, если система не смогла справиться самостоятельно.

3. Система управления с частичной автономностью. Водитель может не контролировать машину на дорогах с "предсказуемым" движением (например, автобаны), но должен быть готовым взять управление.

4. Аналогично 3-му уровню, но система уже не требует внимания водителя.

5. Со стороны человека не требуется никаких действий, кроме старта системы и указания пункта назначения. Автоматическая система может доехать до любой точки назначения, если это не запрещено законом.

Классификация

С точки зрения решения целевой задачи – перемещение транспортного средства из одной точки в другую на глобальной дорожной карте можно выделить следующие сущности (рисунок 1):

– Задачи или мета-сценарии, которые определяются средой (магистраль, дорога в населенном пункте, прилегающая территория) и конечной целью (движение в заданную точку на глобальной карте, парковка и т.п.).

– Сценарии, которые представляют собой протяженные во времени сложные действия, допускающие многовариантное выполнение в зависимости от состояния среды (перестроение, обгон).

– Технологические операции (ТОП) – протяженные во времени действия, являющиеся составными частями сценариев (удержание полосы движения, обнаружение препятствий).

– Алгоритмы – комбинация методов, реализующих технологические операции.

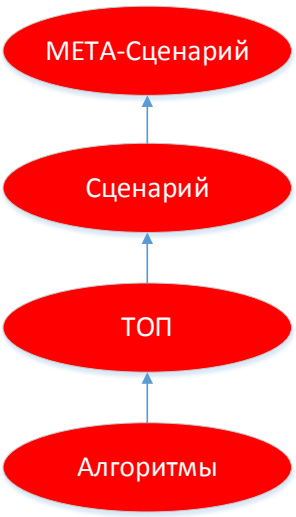


Рисунок 1 – Декомпозиция поведения системы управления автономным транспортным средством

Основные сценарии из которых формируются мета-сценарии:

– выезд на улицу из придомовой территории;

– проезд перекрестка прямо/направо/налево;

– удержание дистанции и полосы движения;

– перестроение;

– обгон;

– парковка.

Каждый из этих сценариев подразумевает выполнение некоторого набора технологических операций (ТОП). Такими технологическими операциями являются:

– повышение качества изображения в условиях плохой видимости;

– формирование области кругового обзора вокруг транспортного средства с информацией о препятствиях, объектах дорожного движения и параметрах их относительного движения;

– определение и отслеживание полосы движения;

– контроль дистанции до впереди идущего транспортного средства;

– определение параметров движения относительно впереди идущего транспортного средства при движении в полосе;

– определение возможности перестроения;

– определение расстояний до близких препятствий при маневрировании и парковке для предотвращения столкновений;

– обнаружение и классификация элементов дорожной инфраструктуры (знаки, светофоры).

Основные технологические операции приведены на рисунке 2.

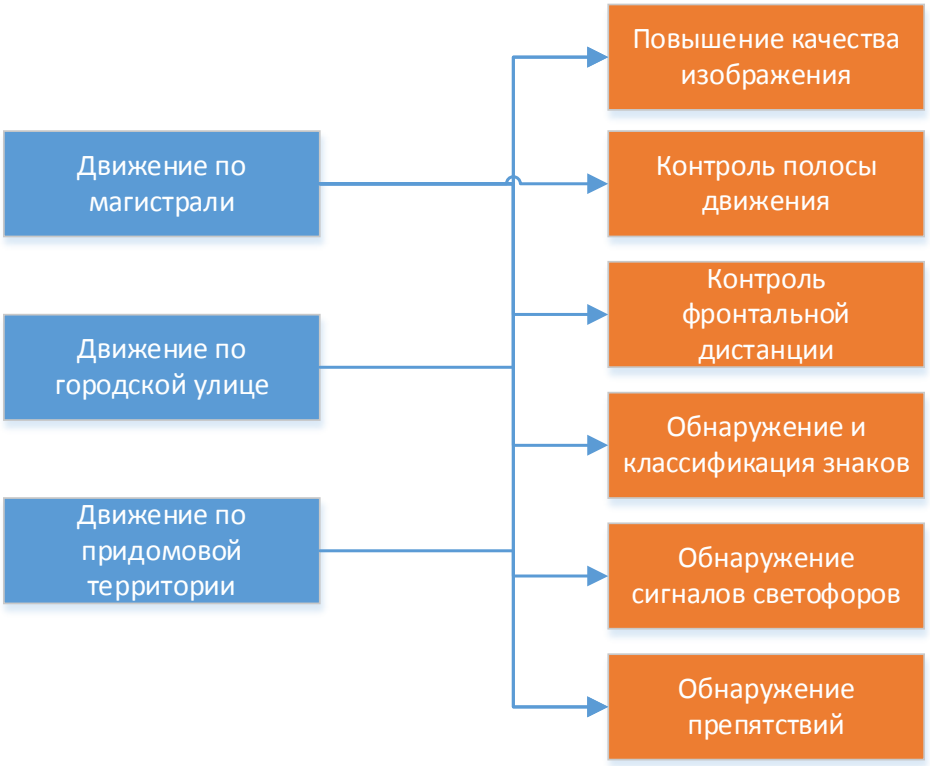


Рисунок 2 – Основные технологические операции

К вспомогательным технологическим операциям можно отнести такие как контроль боковой дистанции, возможности перестроения и анализа погодных условий (рисунок 3).

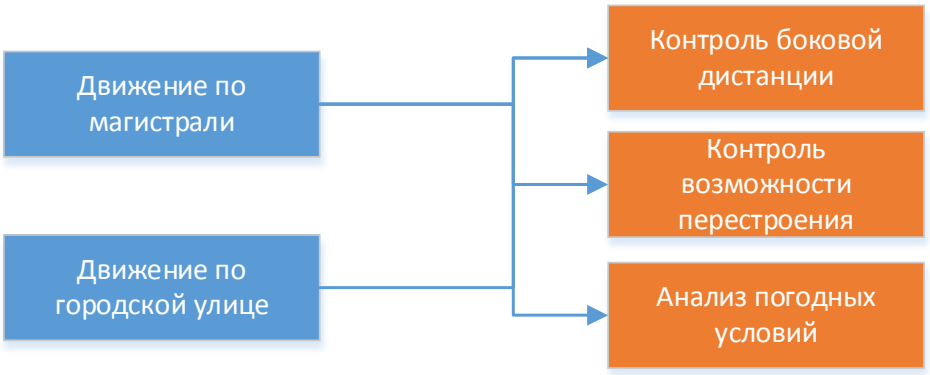


Рисунок 3 – Вспомогательные технологические операции при движении с высокой скоростью

Также можно выделить подзадачу формирования кругового обзора, которую эффективно применять при движении по городской улице или в придомовой территории (рисунок 4).

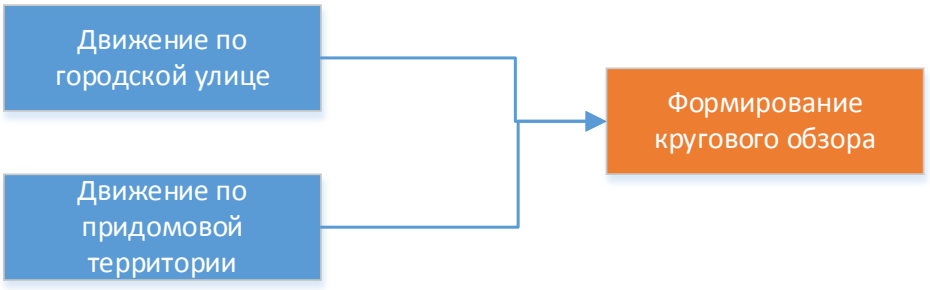


Рисунок 4 – Вспомогательные технологические операции при движении с низкой скоростью

Обнаружение локальных объектов дорожной обстановки

Как было показано выше, на всех уровнях автоматизации от системы требуется распознавать дорожную обстановку, т.е. распознавать средства организации дорожного движения (разметку, знаки, светофоры, ограждения и направляющие устройства и т.п.), другие транспортные средства, людей (пешеходов, велосипедистов), а также различные подвижные и неподвижные препятствия. При этом для получения данных может использоваться не только монокулярная камера, но и камера инфракрасного диапазона, стереокамеры, лидары и радары. Из этого следует, что любая система автономного вождения обязательно должна иметь в своём составе систему технического зрения, и задачи, которые она должна решать, можно разделить на несколько групп:

– Обнаружение и классификация средств организации дорожного движения.

– Обнаружение, классификация, определение параметров движения и построение модели движения транспортных средств, людей, других подвижных препятствий. Объекты этой группы отличаются разнообразным внешним видом, невозможно заранее предсказать все возможные их конфигурации.

– Обнаружение прочих неподвижных препятствий и определение параметров их относительного положения.

Алгоритмическая декомпозиция задачи обнаружения препятствий и объектов дорожной обстановки показана на рисунке 5 [2,3,4], а пешеходов – на рисунке 6 [5-17].

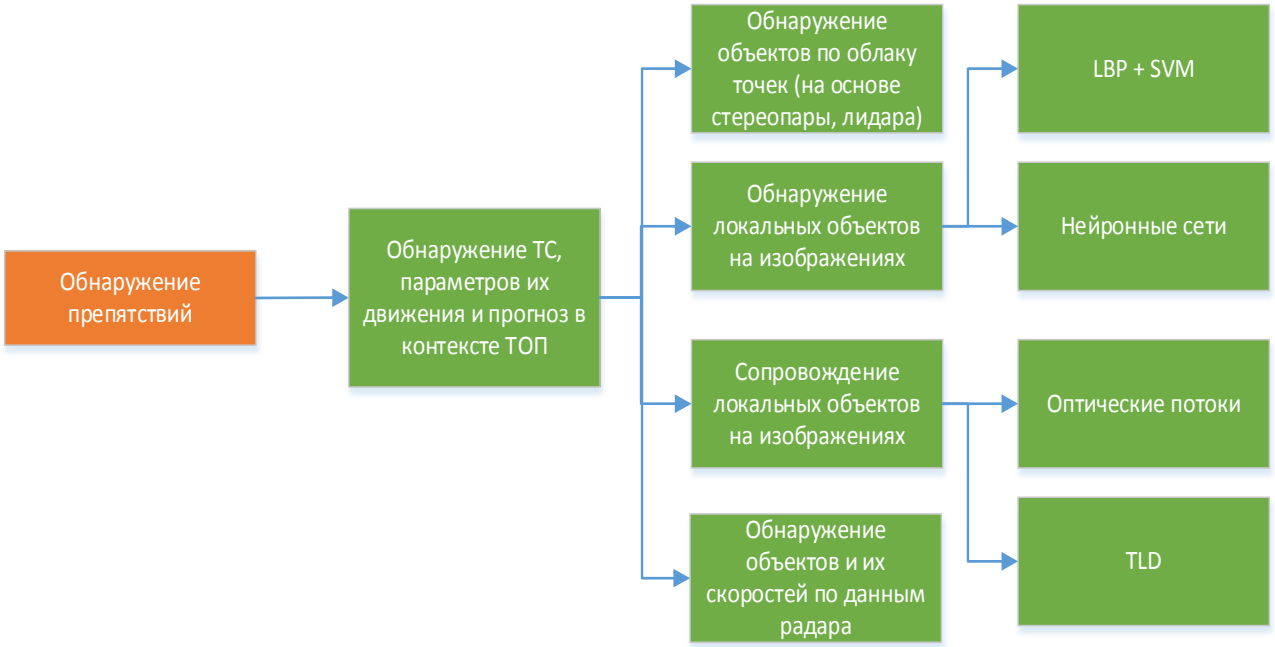


Рисунок 5 – Алгоритмическая декомпозиция задачи обнаружения препятствий и транспортных средств

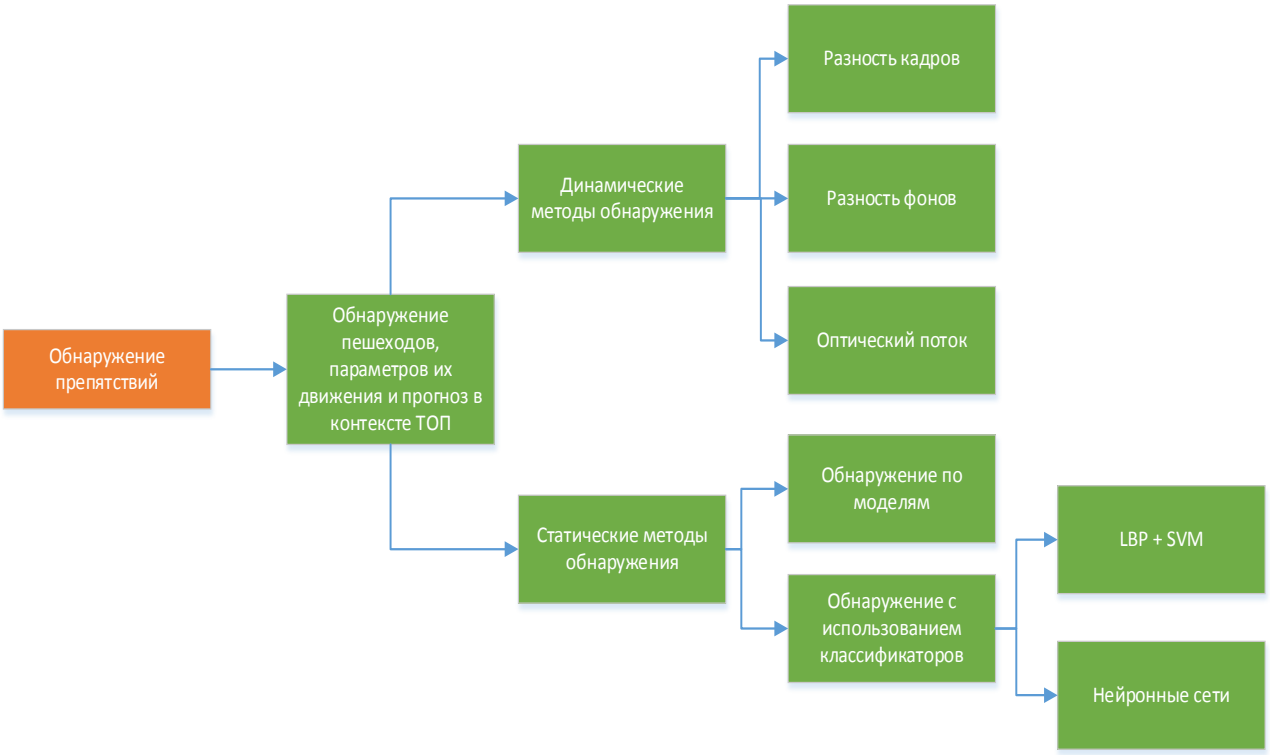


Рисунок 6 – Алгоритмическая декомпозиция задачи обнаружения пешеходов

Отдельно можно выделить алгоритмы, которые могут быть применены для обнаружения дорожных знаков (рисунок 7).

Рисунок 7 – Алгоритмическая декомпозиция задачи обнаружения дорожных знаков

Обнаружение протяженных объектов дорожной обстановки

Методы, используемые в системах поиска дорожной разметки можно условно разделить на четыре уровня. Информация, получаемая на выходе каждого из уровней, является входной для вышестоящего.

Методы первого уровня используют совершенно разнообразные параметры, такие как цвет, геометрическая форма, яркость, локальные перепады яркости [19,20] и т.д. Однако, основываясь на таких простейших параметрах, методы первого уровня являются весьма ненадежными, так как их работоспособность в большой степени зависит от внешних неконтролируемых факторов, таких как освещенность, наличие помех, наличие объектов, схожих с разметкой по анализируемым характеристикам.

После получения информации с помощью нескольких методов каждый из которых основан на одном из параметров, перечисленных выше используются методы второго уровня, производящие фильтрацию и структурирование данных за счет априорных знаний о сущности искомого объекта, т.е. дорожной разметки. В простейшем случае вводятся коридоры значений для угла наклона, ширины и смещения линий разметки.

Так как большинство существующих методов обнаружения дорожной разметки создаются для систем автоматического управления автомобилем, их основной целью является не собственно обнаружение разметки, а создание модели этой разметки. После получения отфильтрованной информации происходит накопление данных за все или несколько предыдущих кадров, и на их основе строится модель дорожного полотна, представляющая полигон, внутри которого автомобиль должен двигаться. Методы, используемые для данных преобразований, условно назовем методами третьего уровня.

Так же ряд систем осуществляет построение прогноза изменения дорожной ситуации, с целью поддержания нормальной работоспособности системы в случае кратковременных помех и отсутствия возможности распознать дорожную разметку. Такие методы - методы четвертого уровня, в подавляющем большинстве случаев основаны на искусственных нейронных сетях и машинном обучении.

Алгоритмическая декомпозиция задачи обнаружения линий дорожной разметки показана на рисунке 8.

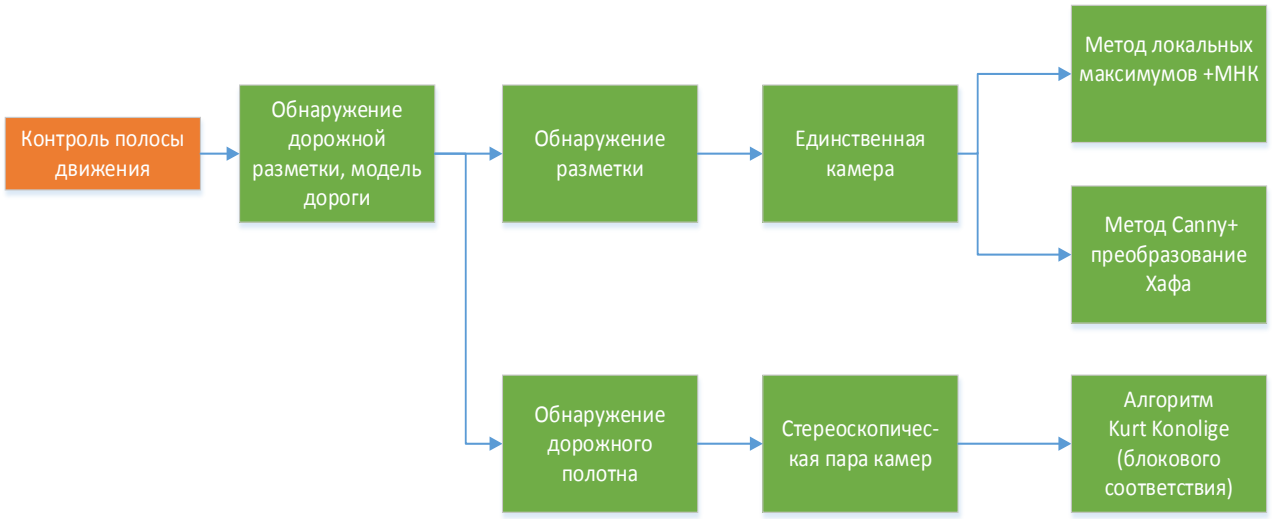


Рисунок 8 – Алгоритмическая декомпозиция задачи обнаружения линий дорожной разметки

Анализ погодных условий

Продолжая классификацию, следует отметить что на выбор алгоритмов существенно влияют текущие погодные условия. Приблизительная классификация таких условий представлена на рисунке 9.

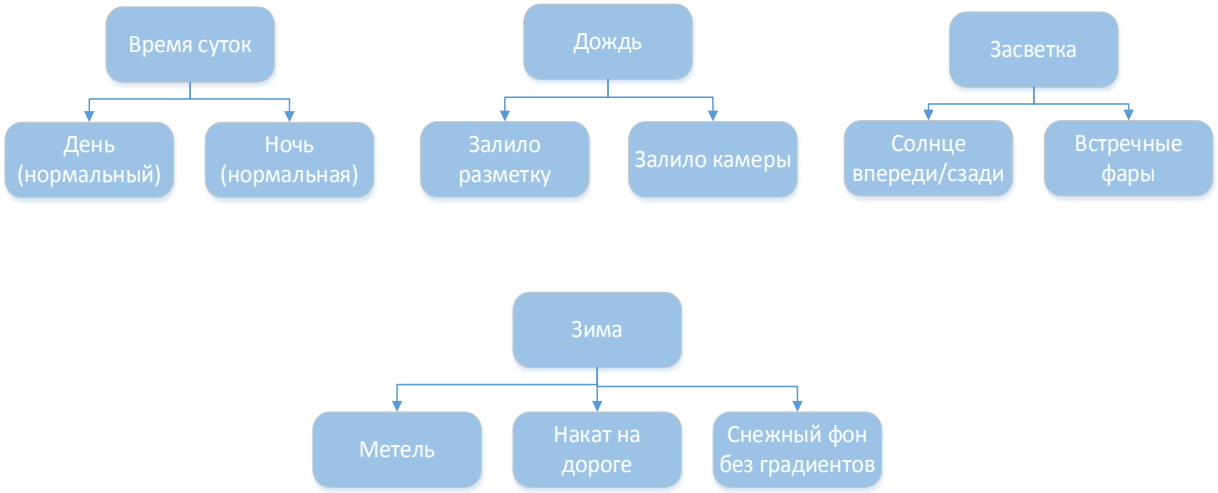


Рисунок 9 – Классификация погодных условий

Соответственно можно выделить отдельную группу технологических операций и алгоритмов ее реализующих, которые должны обеспечивать:

– Анализ текущих погодных условий и принятие решения о текущей погодной ситуации.

– Корректировку реализации задействованных для реализации технологической операции алгоритмов, которые затрагиваются таким решением.

Комплексные методы, решающие задачу автономного вождения

Отдельно можно выделить методы, комплексно решающие задачу автономного вождения в целом, или отдельные ее составные подзадачи. Также следует отметить методы создания нейросетевых решений, решающих задачу управления транспортным средством целиком (end-to-end) [21-23]. Одним из первых решений в этой области можно выделить продукт Comma`AI [24].

Заключение

В работе приведена классификация основных ситуаций в которых функционирует система технического зрения автономного транспортного средства. Все ситуации разделены по сложности на мета-сценарии, реализующие комплексное решение задач, приводящих к достижению цели – автономному перемещению транспортного средства в точку назначения. Основанием для ввода мета-сценариев является существенно различная сложность некоторых типовых ситуаций, таких как движение по магистрали/движение по городской улице/парковка.

Каждый мета-сценарий формируется из набора сценариев, представляющих собой последовательность технологических операций.

Технологические операции в рамках предложенной классификации – это протяженные во времени операции, реализующие отдельную подзадачу в последовательности сценария. Каждая технологическая операция в свою очередь реализуется набором алгоритмов, решающих отдельные задачи такие как обнаружение объектов, определение дистанции, построение модели движения и т.п.

Проведенный анализ алгоритмов позволяет сделать вывод что в настоящее время большинство задач технического зрения наиболее эффективно решается с применением глубоких нейронных сетей. Исключение составляет анализ дорожной разметки и других протяженных объектов и обнаружение и классификация дорожных знаков. Эти задачи могут быть эффективнее решены без применения нейросетевых методов, при условии наложения ограничений на объем и качество обучающих наборов данных (в случае дорожной разметки сложность в обнаружении линий определяется необходимостью решать задачу сегментации дорожного полотна, что резко повышает трудоемкость при формировании обучающих наборов данных; а в случае обнаружения дорожных знаков – искусственный характер объектов и их ограниченная сложность позволяет эффективно применять методы анализа цвета и формы).

В качестве направлений дальнейших исследований можно выделить проработку системы принятия решения, обеспечивающей выбор алгоритмов, технологических операций и сценариев в зависимости от текущего положения транспортного средства, результатов анализа погодных условий, данных с датчиков транспортного средства о состоянии дорожного полотна и др.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы». Соглашение о предоставлении субсидии №14.581.21.0022 от 03.10.2017 г. (уникальный идентификатор проекта RFMEFI58117X0022).

1. SAE International, «Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles.», 2016. [Электронный ресурс]. Доступ: http://standards.sae.org/j3016_201609/ [Дата обращения: 19.12.2017].
2. Shaoqing Ren, Kaiming He, Ross Girshick, Jian Sun, «Faster R-CNN: Towards Real-Time Object Detection with Region Proposal Networks», 2015. [Электронный ресурс]. Доступ: https://arxiv.org/abs/1506.01497 [Дата обращения: 16.12.2017].
3. Joseph Redmon, Santosh Divvala, Ross Girshick, Ali Farhadi, «You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection», 2015. [Электронный ресурс]. Доступ: https://pjreddie.com/media/files/papers/yolo.pdf [Дата обращения: 16.12.2017].
4. N. A. Mandellos, et al., «A background subtraction algorithm for detecting and tracking vehicles», Expert Systems with Applications, vol. 38, pp. 1619-1631, 2011. Доступ: https://www.researchgate.net/publication/220215435_A_background_subtraction_algorithm_for_detecting_and_tracking_vehicles [Дата обращения: 16.12.2017].
5. Wei Liu, Dragomir Anguelov, Dumitru Erhan, Christian Szegedy, Scott Reed, Cheng-Yang Fu, Alexander C. Berg, «SSD: Single Shot MultiBox Detector», 2015. [Электронный ресурс]. Доступ: https://arxiv.org/abs/1512.02325 [Дата обращения: 16.12.2017].
6. Joseph Redmon, Ali Farhadi, «YOLO9000: Better, Faster, Stronger», 2016. [Электронный ресурс]. Доступ: https://arxiv.org/abs/1612.08242 [Дата обращения: 16.12.2017].
7. D.M. Gavrila, V. Philomin. Real-time object detection for smart vehicles. In Computer Vision, The Proceedings of the Seventh IEEE International Conference, volume 1, pages 87-93, 1999.
8. D.M. Gavrila, J. Giebel. Shape-based pedestrian detection and tracking. Intelligent Vehicle Symposium, IEEE, volume 1, pages 8-14, June 2002.
9. T. Zhao, R. Nevatia, F. Lv. Segmentation and tracking of multiple humans in complex situations. Computer Vision and Pattern Recognition, Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society conference, volume 2, pages 194-201, 2001.
10. T. Zuo. An Efficient Vision-Based Pedestrian Detection and Tracking System for ITS Applications. University of Ottawa, 2014.
11. H. Wang, R. Lu, X. Wu, L. Zhang, J. Shen. Pedestrian detection and tracking algorithm design in transportation video monitoring system. Information Technology and Computer Science, International Conference. Volume 2, pages 53-56, July 2009.
12. Q. Liu, O. Osechas, J. Rife. Optical flow measurement of human walking. Position Location and Navigation Symposium, IEEE, pages 547-554, April 2012.
13. D. Schreiber, M. Rauter. Gpu-based non-parametric background subtraction for a practical surveillance system. Computer Vision Workshops, IEEE 12th International Conference, pages 870-877. Sept 2009.
14. N. Dalal, B. Triggs, C. Schmid. Human detection using oriented histograms of flow and appearance. Proceedings of the 9th European Conference on Computer Vision – Volume 1, Part 2, ECCV`06, pages 428-441.
15. S.Walk, N. Mayer, K. Schindler, B. Schiele. New features and insights for pedestrian detection. Computer Vision and Pattern Recognition. IEEE Conference, pages 1030-1037, June 2010.
16. X. Wang, T.X. Han, S. Yan. An HOG-LBP human detector with partial occlusion handling. Computer Vision, IEEE 12th International Conference, pages 32-39, Sept. 2009.
17. H. Fukui, T. Yamashita. Pedestrian Detection Based on Deep Convolutional Neural Network with Ensemble Inference Network. 2015J. M. Alvarez and A. M. Lopez. Road detection based on illuminant invariance. IEEE Trans. Intelligent Transportation Systems, August 2010.
18. Chen T. W., Chen Y. L., Chien S. Y. Fast image segmentation based on K-Means clustering with histograms in HSV color space //multimedia signal processing, 2008 IEEE 10th Workshop on. – IEEE, 2008. – С. 322-325.
19. Huang A. S. et al. Finding multiple lanes in urban road networks with vision and lidar //Autonomous Robots. – 2009. – Т. 26. – №. 2-3. – С. 103-122.

20. López A. et al. Robust lane markings detection and road geometry computation //International Journal of Automotive Technology. – 2010. – Т. 11. – №. 3. – С. 395-407.
21. Arna Ghosh, Biswarup Bhattacharya, Somnath Basu Roy Chowdhury. SAD-GAN: Synthetic Autonomous Driving using Generative Adversarial Networks, arXiv:1611.08788 (2016).
22. Mehdi Rezagholizadeh, Md Akmal Haidar. Semi-supervised Regression with Generative Adversarial Networks for End to End Learning in Autonomous Driving. The 6th International Conference on Learning Representations, April 30 - May 3, 2018. ICLR 2018 Conference Track (2018).
23. Hesham M. Eraqi, Mohamed N. Moustafa, and Jens Honer. End-to-End Deep Learning for Steering Autonomous Vehicles Considering Temporal Dependencies. 31st Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS), arXiv:1710.03804 (2017).
24. Eder Santana, George Hotz. Learning a Driving Simulator, arXiv:1608.01230 (2016).

A.V. Grivachev, V.O. Avdeev, V.V. Varganov, E.A. Titenko

THE MODIFIED METHOD OF HIERARCHICAL ANALYSIS OF FOR THE SELECTION OF MOBILE ROBOTECHNICAL COMPLEXES

South West State University, Kursk
garpun-22@gmail.com, v.o.avdeev@gmail.com, npcvvv@yandex.ru, johntit@mail.ru

Abstract

The paper considers the problem of estimating and choosing the best alternative from the set of initial variants with reference to robotic complexes. Robotic complexes are characterized by a large set of diverse structural and functional indicators and various tactical and technical characteristics. For a number of organizational reasons, they are not covered by a single methodological approach. As a result, robotic complexes have a heterogeneous composition and different objective functions, so they do not always allow direct comparison between themselves. These features justify the development of mathematical models and tools for multi-criteria analysis of complex technical objects with overlapping characteristics. The hierarchy analysis method has traditionally been used to solve this problem. According to this method, the expert proceeds from the fact that the considered alternatives are understood as elementary objects, which he can "instantly" estimate and give an objective quantitative assessment. Nevertheless, the complexity of ground-based robotic systems exceeds a certain threshold level of uniform perception on the part of the expert. In this regard, the accuracy and objectivity of assessments requires refinement, and the method itself - system development. The essence of the modification of the hierarchy analysis method lies in the introduction of additional information due to the interpretation of the compared robotic complexes as composite objects. The allocation of logically and functionally completed subsystems allows you to get additional information on them in the form of general and individual indicators. As a result, additional information appears in the modified method, which is used to perform verification and corrective steps. This information reduces the subjectivity of the original data. The method includes a method for recording heterogeneous indicators. This method realizes the transition from absolute estimates of subsystems to relative pair correction coefficients with the choice and estimation of the logical correctness of the unifying function, directed processing of the weights of the exponents in the range [0; 1]. Depending on the preferences of the decision maker, the method uses a local or global stimulating model to calculate the refined weights of the criteria, which allows us to use a modified method of analyzing hierarchies in different subject areas.

Key words: a complex technical object, decision-making, a correction factor, a way of accounting for disparate indicators.

А.В. Гривачев, В.О. Авдеев, В.В. Варганов, Е.А. Титенко

МОДИФИЦИРОВАННЫЙ МЕТОД АНАЛИЗА ИЕРАРХИЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ НАЗЕМНЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Юго-Западный государственный университет, г. Курск
garpun-22@gmail.com, v.o.avdeev@gmail.com, npcvvv@yandex.ru, johntit@mail.ru

Аннотация

В работе рассматривается задача оценки и выбора лучшей альтернативы из множества исходных вариантов применительно к робототехническим комплексам. Робототехнические комплексы характеризуются большим набором разнородных структурно-функциональных показателей и различными тактико-техническими характеристиками. В силу ряда организационных причин они не охвачены единым методологическим подходом. В результате робототехнические комплексы имеют разнородный состав и различные целевые функции, поэтому они не всегда допускают прямое сравнение между собой. Эти особенности обосновывают развитие математических моделей и средств многокритериального анализа сложных технических объектов с частично совпадающими характеристиками. Метод анализа иерархий традиционно используется для решения данной задачи. По данному методу эксперт исходит из того, что рассматриваемые альтернативы понимаются как элементарные объекты, которые он может «мгновенно» оценить и дать объективную количественную оценку. Тем не менее, сложность наземных робототехнических комплексов превосходит некоторый пороговый уровень единообразного восприятия со стороны эксперта. В связи с этим точность и объективность оценок требует уточнений, а сам метод – системного развития. Сущность модификации метода анализа иерархий заключается во введении дополнительной информации за счет трактовки сравниваемых робототехнических комплексов как составных объектов. Выделение логически и функционально завершенных подсистем позволяет получить по ним дополнительную информацию в виде общих и индивидуальных показателей. В итоге в модифицированном методе появляется дополнительная информация, которая используется для выполнения проверочных и корректирующих шагов Данная информация позволяет уменьшить субъективизм исходных данных. В состав метода введен способ учета разнородных показателей. Этот способ реализует переход от абсолютных оценок подсистем к относительным парным поправочным коэффициентам с выбором и оценкой логической корректности объединяющей функции, направленной обработку весов показателей в диапазоне [0; 1]. В зависимости от предпочтений ЛПР способ использует локальную или глобальную стимулирующую модель вычисление уточненных весов критериев, что позволяет использовать модифицированный метод анализа иерархий в различных предметных областях.

Ключевые слова: составной технический объект, принятие решений, поправочный коэффициент, способ учета разнородных показателей

Теоретическая и прикладная значимость систем поддержки принятия решений (СППР) определяется тем, что рассматриваемые задачи анализа, сравнения и выбора сложных систем и объектов (транспортные средства, подвижные роботы, смартфоны, недвижимость, финансовые акции/бумаги, технологии/методики производства наукоемкой продукции, инновации; ПО/информационные системы и др.) входят в более широкий класс задач распознавания образов и прогнозирования поведения [1, 2]. Соответственно подходы, модели, методы и алгоритмы принятия решений применяются для процессов анализа, сравнения и выбора лучших вариантов (альтернатив) в признаковом пространстве таких систем и объектов.

В работе в качестве сложных объектов и систем рассматривается класс подвижных наземных робототехнические комплексы (РТК) гусеничного хода, характеризуемых большим набором разнородных структурно-функциональных показателей и различными тактико-техническими характеристиками (ТТХ) [3,4]. В настоящее время известные наземные РТК не охвачены единым методологическим подходом, что приводит к избыточным затратам в жизненном цикле проектирования, производства и эксплуатации РТК, имеющих разнородный состав и различные целевые функции. Кроме того, показатели и ТТХ сравниваемых альтернатив не всегда допускают прямое сравнение. Данная особенность значительно усложняет задачу анализа и выбора лучшей альтернативы и не позволяет дать объективный прогноз развития техники. В этой связи вопрос

прогнозирования развития РТК и выбора перспективных технических решений, целесообразных для всего класса подвижных роботов является открытым.

Для снятия данного ограничения в работе развивается широко применимый для оценки и выбора лучшей альтернативы метод анализа иерархий (МАИ) [5]. МАИ традиционно используется в условиях отсутствия полной и точной информации об альтернативах, разнородных шкал измерения критериев оценки. Как первичный шаг получения исходных данных МАИ использует экспертные оценки, которые в дальнейшем на основе аппарата матриц преобразуются в вектора приоритетов критериев и далее альтернатив. Несмотря на «экспертоемкость», т.е. субъективизм исходных данных, метод имеет линейную сложность и аддитивные решающие функции, позволяющие для большинства случаев давать результаты, которые совпадают с результатом человека [6, 7, 8].

Критерии оценки РТК являются отражением функциональных (с точки зрения разработчика) или качественных (с точки зрения потребителя) возможностей комплекса. Достижение целевого результата связывается с определением оптимума целевой функции. Для разработчика РТК целевая функция – это функция оценки структурно- функциональных характеристик изделия Она относится преимущественно к начальным стадиям жизненного цикла изделия «разработка – внедрение». Для потребителя РТК целевая функция – это функция оценки полезности изделия, т.е. оценки эксплуатационных возможностей.

Системная особенность рассматриваемых систем заключается в том, что РТК относятся к классу наукоемкой высокотехнологичной продукции, допускающей двойное применение. В связи с этим выбор лучшей альтернативы должен сопрягаться (в идеале) со всеми стадиями жизненного цикла (ЖЦ) такой продукции (от проектирования до утилизации), что не всегда поддается формализации и обработке. В общем случае, жизненный цикл применения наукоемкой и высокотехнологической продукции (к ней относится РТК) включает последовательность из 8 стадий:

1. Разработка;
2. Моделирование;
3. Внедрение;
4. Эксплуатация;
5. Ремонт;
6. Модернизация;
7. Развитие;
8. Утилизация.

Соответственно целевая функция разработчиков преимущественно соотносится с начальными стадиями ЖЦ (разработка – моделирование- внедрение), а целевая функция потребителей ориентируется больше на серединные стадии ЖЦ (эксплуатация – ремонт – модернизация). В редких случаях для задач анализа и выбора наукоемкой продукции задаются переменные/показатели для оценки заключительных стадий ЖЦ (развитие – утилизация). В связи с этим целесообразны модель и методы анализа и выбора лучшей высокотехнологичной альтернативы, учитывающих потенциальные возможности альтернативы и его лучшие технические решения, т.е. приветствуются некоторые прогностические свойства методов оценки и выбора альтернатив.

Согласно теории Т. Саати в методе анализа иерархий [5] эксперт исходит из того, что рассматриваемые альтернативы понимаются экспертом как элементарные объекты, которые он может «мгновенно» оценить и дать объективную количественную оценку. Формирование квадратной матрицы парных сравнений (МПС) над альтернативами основывается на их принадлежности к единому классу, имеющему совпадающую структуру и одинаковые типы показателей. Тогда оценки над парами альтернатив имеют общую область допустимых значений, а обработка МПС критериев и альтернатив является корректной. Тем не менее, типы и виды РТК считать однородным классом не всегда возможно или корректно, поэтому возникает необходимость в расширении МАИ и включении в метод дополнительной информации структурно-функционального характера об исходных данных и вариантах представления промежуточных результатов.

В отличие от известных работ сложность наземных РТК превосходит некоторый пороговый уровень единообразного восприятия со стороны эксперта. В связи с этим точность и объективность оценки становятся частично совпадающими показателями, не позволяющими всесторонне сравнивать альтернативы и выявлять объективно лучшую из них.

Ведущий замысел модификации метода связан с пониманием сравниваемых альтернатив как составных объектов, делимых на отдельные подобъекты (подсистемы). Известно, что отождествление и сравнение – это элементарные акты (процессы) мыслительной деятельности, свойственные естественному интеллекту [5]. МАИ, предложенный Т. Саати, использует и формализует только процесс последовательного парного сравнения альтернатив как неделимых сущностей. В дополнение к этому предлагается формализовать и использовать процесс отождествления, т.е. проверки наличия у альтернативы определенного свойства. В результате эксперт осуществляет не только сравнение альтернатив между собой, но и выявляет наличие общих и индивидуальных характеристик (свойств) у подобъектов. В связи с этим в МАИ появляется дополнительная информация, которая используется для выполнения проверочных и корректирующих шагов. Таким образом, объединение и формализация базовых процессов мыслительной деятельности человека (отождествление и сравнение) составляет сущность модификации МАИ.

Исходя из проектных, производственных и эксплуатационных условий для отождествления РТК по общим и индивидуальным показателям по различным стадиям жизненного цикла высокотехнологичной продукции выбраны следующие 5 критериев:

К1 – проходимость РТК;

К2 – структурная и функциональная комплектация РТК;

К3 – надежность и безопасность РТК;

К4 – ремонтопригодность и ремонтоспособность РТК;

К5 – автоматизация и интеллектуализация функций РТК.

Главная особенность данного набора критериев – их независимость между собой, что позволяет в дальнейшем использовать упорядоченные кортежи переменных для процессов распознавания и прогнозирования в некотором признаковом пространстве.

С одной стороны, альтернатива оценивается по принятым критериям *К1 – К5*. Тогда каждому РТК ставится в соответствие вектор $x = \{x_1, x_2 \ldots x_5\}$, задающий точку в пятимерном признаковом пространстве. Итоговый критериальный вес РТК оценивается как средневзвешенная сумма значений по каждой переменной (критерию). С другой стороны, РТК разбивается на q подсистем, каждая из которых описывается общими и индивидуальными показателями количеством s и p соответственно. Итоговая оценка РТК проводится с учетом особенности распределения общих и индивидуальных показателей. Исходные оценки критериев, задаваемые экспертом, отождествляются по умолчанию с общими показателями, которые принадлежат всем альтернативам. Если *i-му* критерию соответствует некоторое число индивидуальных показателей по q подсистемам, то вес такого критерия пропорционально смещаются в большую сторону. Если *i-му* критерию не соответствуют ни один индивидуальный показатель, то его вес определяется только значением общих показателей, т.е. он остается заданным экспертом. Таким образом, в продолжение идеологии Т. Саати для учета индивидуальных показателей подсистем альтернатив используется стимулирующая природа уточнения веса критерия.

Пусть для каждого РТК, оцениваемого по k критериям $K_1 – K_k$ *(k=5)*, эксперт формирует следующую таблицу весов показателей в критерий K_i *(i=1-k)*, где (vs_i, vp_i) – двухэлементный вектор критериального веса РТК по *i*-му критерию (табл.1).

Таблица 1. Распределение общих и индивидуальных показателей РТК по критериям

Критерии	1		2			q	
	s	p_1	*s*	p_2	…	*s*	p_q
K_i *(i=1-k)*					…		
	vs_1	vp_2	vs_2	vp_2		vs_q	vp_q

Тогда значения элементов критериальных весов определяются отдельно как

$$vs = |s^*| / |s| \quad (4)$$

$$vp = |p_i^*| / |p_1 \cup p_2 \cup \ldots p_q| \quad (5)$$

где s^*, p_i^* - показатели из группы общих и индивидуальных соответственно, принадлежащие критерию K_i.

В дальнейшем двухэлементные вектора {(vs_1, vp_1), {(vs_2, vp_2), … {(vs_q, vp_q)} участвуют в выполнении проверочных и корректирующих шагов на этапах МАИ.

В МАИ [6] можно выделить следующие этапы:

– построение иерархии предметной области и формирование критериев оценки объектов;

– составление матрицы парных сравнений (МПС) критериев;

– получение вектора приоритетов критериев, т.е. локального вектора весов;

– оценка степени согласованности МПС критериев;

– составление квадратной матриц парных сравнений (МПС) объектов по каждому критерию;

– получение векторов приоритетов объектов по каждому критерию, т.е. локальных векторов весов объектов;

– оценка степени согласованности всех МПС;

– составление сводной матрицы весов объектов по всем критериям;

– вычисление глобального вектора приоритетов объектов, выбор наилучшей альтернативы.

Первый этап МАИ состоит в иерархическом описании предметной области. Элемент верхнего уровня иерархии - главная цель многокритериального выбора, элементы нижнего уровня – альтернативы как неделимые объекты. Каждый промежуточный элемент иерархии выступает как локальная цель, значение которой определяется вкладом элементов нижних уровней, соотносящихся с локальной целью.

Второй этап МАИ – построение квадратной матрицы парных сравнений критериев. На этом этапе последовательные парные сравнения критериев выполняются экспертом. В результате строится квадратная МПС. Именно МПС критериев вносит существенную долю субъективизма в дальнейшие вычисления по ранжированию альтернатив и выбору лучшей из них.

Для выявления различий между альтернативами, понимаемых как элементарные объекты, экспертом используется стандартная 9-значная шкала прямых оценок (табл.1) и 8- значная шкала обратных оценок (1/9, 1/8, ..., 1/2,).

Из стандартной шкалы оценок МАИ следует, что эксперт в состоянии разграничить 5 основных величин и 4 промежуточные величины, т.е. в сумме размер области различения объектов равен 9. Сравнение большого числа объектов (критерии, машины, недвижимость и др.) с примерно одинаковым описанием может, в общем случае, приводить к не различению некоторых пар объектов.

Таблица 2. Шкала прямых оценок пары альтернатив

Относительная важность	**Содержание суждения**	**Комментарий**
1	Равная важность	Равная оценка объектов (объекты несравнимы)
3	Умеренное превосходство	Легкое превосходство одного объекта над другим
5	Существенное превосходство	Сильное превосходство одного объекта над другим
7	Значительное превосходство	Практически значительное превосходство одного объекта над другим
9	Очень сильное превосходство	Абсолютное превосходство одного объекта над другим
2, 4, 6, 8	Промежуточные решения	Применяются в компромиссном случае

Для уменьшения потенциально негативного эффекта от «короткой» шкалы измерений применительно к высокотехнологичным объектам (например, РТК) предлагается учитывать структурно-функциональные характеристики важнейших подсистем таких объектов в виде оценки общих и индивидуальных показателей подсистем РТК в критерии. Для этого создан оригинальный способ учета общих и индивидуальных показателей РТК в критерии.

Способ состоит из последовательности шагов:

1) заполнение таблицы распределения общих и индивидуальных показателей подсистем альтернативы по критериям;

2) вычисление таблицы весов общих и индивидуальных показателей подсистем альтернативы по критериям;

3) на основе локальной или глобальной стимулирующей модели вычисление таблицы уточненных весов общих показателей подсистем альтернативы по критериям;

4) вычисление итоговых «критериальных» весов для альтернативы;

5) создание сводной таблицы «критериальных» весов для *m* альтернатив ;

6) вычисление вектора итоговых поправочных коэффициентов;

7) вычисление квадратной матрицы парных поправочных коэффициентов критериев.

Вклад каждого из показателей подсистем в составе РТК оценивается локальным весом показателя в нормированной шкале [0-1]. Интегральное значение веса критерия («критериального веса») определяется операцией сборки вкладов общих показателей от *q* подсистем РТК. При этом в расчетах участвуют уточненные общие показатели от *q* подсистем РТК. Процедура уточнения связывается с учетом значения индивидуального показателя, смещающего в большую сторону вес общего показателя в пределах одной подсистемы. Фактически в данном способе принимается прогрессивно-стимулирующая модель вклада показателей РТК в оценки критериев.

В итоге для *m* РТК формируется *m* таблиц по $q \times k$ элементов вклада показателей РТК в критерии K_i *(i=1-k* (табл.2). В отличие от матрицы парных сравнений **эти таблицы формируются как таблица абсолютных оценок** в нормированной шкале [0-1]. Они по существу являются дополнительной информацией об альтернативах, понимаемых уже как составные объекты. Дополнительная информация формируется на основе функций сборки весовых показателей (vs_{ij}, vp_{ij}), *(i=1– k), (j=1 – q)* в соответствии с шаблоном (табл.3).

Таблица 3. Шаблон расчета функций сборки весовых показателей (vs_{ij}, vp_{ij}) РТК

Критерии	1		2			q		*Ф-ции вклада в критерии по строкам*
	s	p_1	*s*	P_2		*s*	p_m	
K_1	vs_{11}	vp_{11}	vs_{12}	Vp_{12}		vs_{1m}	vp_{1m}	φ_3^*; φ_4^*
K_2	vs_{21}	vp_{21}	vs_{22}	Vp_{22}		vs_{2m}	vp_{2m}	φ_3^*; φ_4^*
K_3	vs_{31}	vp_{31}	vs_{32}	Vp_{32}		vs_{3m}	vp_{3m}	φ_3^*; φ_4^*
…								
K_k	vs_{k1}	vp_{k1}	vs_{k2}	vp_{k2}		vs_{km}	vp_{km}	φ_3^*; φ_4^*
Ф-ции вклада в РТК по столбцам								
$\varphi_1(s_{11}, s_{k1})$	φ_1^*		φ_1^*			φ_1^*		
		φ_2^*		φ_2^*			φ_2^*	

Где φ_1^* φ_2^* φ_3^*; φ_4^* – функции «сборки» весовых вкладов показателей

Как правило, в качестве φ_1^* φ_2^* φ_3^*; φ_4^* применяются аддитивные, мультипликативные, и иные сборочные функции вычисления среднего [9].

Поэлементное уточнение веса общего показателя через значение индивидуального показателя осуществляется через локальную или глобальную прогрессивно-стимулирующую модели.

Локальная прогрессивно-стимулирующую модель реализуется формулой вида

$$vs_i' = vs_i^* (1+vp_i^*) \quad (3)$$

Согласно (3) общий показатель vs_i' смещается в рамках подсистемы на основе только соответствующего индивидуального показателя vp_i^*. Отсутствие влияния индивидуальных показателей других подсистем РТК является отличительной чертой данной модели.

Сборка в итоговое значение вклада всех индивидуальных показателей (p_1^*, p_2^*, … p_q^*) является основой глобальной прогрессивно-стимулирующей модели вклада показателей подсистем РТК в критерии. В этом случае по каждому критерию K_i ($i=1-k$) на основе единой функция сборки вычисляется уточненное значение

$$vs_i' = vs_i^* (1+\varphi_4(vp_{i1}^*, vp_{i2}^*, \dots vp_{iq}^*)) \quad (4)$$

Согласно (3), (4) веса общих показателей смещаются в большую сторону, поэтому они перестают быть нормированными, что в дальнейшем должно быть компенсировано переходом к относительным парным поправкам, необходимым в рамках МАИ.

Для сборки могут применяться различные функции (функции $\varphi_3^* = \varphi_3(s_{ij})$), которые в зависимости от предпочтений ЛПР учитывают характер влияния подсистем на критерии:

– показатель лучшей подсистемы;

– показатель худшей подсистемы;

– средние показатели по подсистемам (среднеарифметическое, среднеквадратичное, среднегеометрическое, среднегармоническое и др.).

Заключительный шаг способа – переход к относительным поправочным коэффициентам (поправкам), необходимым в рамках МАИ для дифференциации значений в МПС. Для этого создается сводная таблица распределения q итоговых «критериальных» весов по m РТК (табл.4). По ней вычисляется вектор поправочных коэффициентов (ПК) (традиционная операция среднеарифметического), а по ней –матрица парных поправочных коэффициентов (МППК) для q критериев. Далее с помощью операции среднеарифметического $\Sigma()$ можно получить итоговую МППК.

Таблица 4. Сводная таблица «критериальных» весов

	$РТК_1$	$РТК_2$	…	$РТК_m$	$\Sigma()$
K_1			…		
K_2			…		
K_3			…		
…			…		
K_q			…		

Последний столбец табл.4 содержит вектор итоговых ПК, он является входным операндом для построения МППК (табл.5). Матрица парных поправочных коэффициентов содержит уже относительные нормированные значения и удовлетворяет требованиям построения МПС, в частности является обратно и содержит элементы «1» на главной диагонали.

Таблица 5. Матрица парных поправочных коэффициентов

	K_1	K_2	K_3	…	K_q
K_1	1				
K_2		1			
K_3			1		
…					
K_q					1

Полученная квадратная МППК используется для уточнения исходной матрицы парных сравнений (МПС) критериев, задаваемой экспертом по формуле

$$МПС'(q \times q) = МПС(q \times q) \times МППК(q \times q) \quad (5)$$

где $МПС'(q \times q)$ – уточненная МПС.

Таким образом, разработан модифицированный метода анализа иерархий, отличающийся введением на втором этапе оригинального способа оценки вклада общих и индивидуальных показателей подсистем. Способ состоит в реализации перехода от абсолютных оценок подсистем к относительным парным поправочным коэффициентам с выбором и оценкой логической корректности объединяющей функции, направленной обработку весов показателей в диапазоне [0;1]. В зависимости от предпочтений ЛПР способ использует локальную или глобальную стимулирующую модель вычисление уточненных весов критериев, что позволяет ввести и использовать дополнительную информацию для принятия решения при выборе лучшей альтернативы и в системах обработки знаний [10, 11].

1. Зак Ю. А. Принятие многокритериальных решений М.: Экономика, 2011.235 с.
2. Халин Ю.А., Лисицин Л.А., Лисицин А.Л. Системы поддержки принятия управленческих решений в условиях неполной информации // Известия Юго-Западного государственного университета. 2012. № 4-2. С. 95.
3. Лоторев П.В., Курочкин А.Г., Гривачев А.В., Емельянов С.Г. Организация системы поддержки принятия решений для управления группой роботов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2015. № 3 (16). С. 30-36.
4. Курочкин А.Г., Емельянов С.Г., Бородин М.В. Продукционная модель для координации бесконфликтного расположения группы автономных роботов // Информационно- измерительные и управляющие системы. 2015. т.13, N6. С. 10-14.
5. Саати Т. Л. Принятие решений. Метод анализа иерархий. М.: Радио и связь, 1993. 320 с.
6. Миронова Н.А. Интеграция модификаций метода анализа иерархий для систем поддержки принятия групповых решений // Радиоэлектроника, информатика, управление. 2011. №2. С.47-54.
7. Гривачев А.В., Сазонов С.Ю. Сравнительный анализ методов и подходов многокритериального выбора сложных мобильных систем // Известия Юго-Западного государственного университета. 2016. № 5. С. 35-43.
8. Гривачев А.В., Курочкин А.Г., Емельянов С.Г. Структурно-алгоритмический подход для сравнительной оценки мобильных роботов // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2016. т. 14. № 6. С. 29-33.
9. Анфилатов В.С., Емельянов А.А., Кукушкин А.А. Системный анализ в управлении: учеб. пособие – М. : Финансы и статистика, 2002. 368 с.
10. Довгаль В.М., Титов В.С., Титенко Е.А. Стратегии быстрых символьных вычислений для исчислительной продукционной системы // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2008. Т. 51.№ 2. С. 44-47.
11. Титенко Е.А. Общая структурная схема реконфигурируемого мультипроцессора // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2011. т.7. №9. С. 53 - 57.

K.I. Kiy

IMAGE UNDERSTANDING SYSTEMS BASED ON THE GEOMETRIZED HISTOGRAMS METHOD

Keldysh Institute of applied mathematics of RAS, Moscow, konst.i.kiy@gmail.com

Abstract

Based on the geometrized histograms method, a framework for designing image understanding systems for recognizing images and video sequences of images is proposed. Leaning on this framework, systems for understanding images and video sequences of image of road scenes are implemented. In particular the framework for designing a system for detecting vehicles on roads is presented. The implementation of the system as a programming complex is described. The results of programming experiments are presented and discussed.

Key words: image segmentation, image understanding systems, analysis of road scenes, navigation of pilotless vehicles.

К.И. Кий

СИСТЕМЫ ПОНИМАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ, ОСНОВАННЫЕ НА МЕТОДЕ ГЕОМЕТРИЗОВАННЫХ ГИСТОГРАММ

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт прикладной математики им. Келдыша Российской Академии Наук (ИПМ РАН), Москва
konst.i.kiy@gmail.com

Аннотация

На основе метода геометризованных гистограмм предлагается схема построения систем понимания изображений и видеопоследовательностей изображений. На базе данной схемы реализуется построение систем понимания изображений и видеопоследовательностей изображений дорожных сцен. В частности, приводится схема построения системы поиска автомобилей на дороге. Описывается реализация системы в виде программного комплекса. Приводятся и обсуждаются результаты программных экспериментов.

Ключевые слова: сегментация изображений, системы понимания изображений, анализ дорожных сцен, навигация беспилотных автомобилей.

Введение

В последнее тема создания роботов-автомобилей для движения по дорогам общего пользования широко обсуждается и освещается как в прессе, так и в научном сообществе. Большое количество публикаций посвящено различным аспектам понимания дорожных сцен [1–4]. Накопившиеся данные по эксплуатации тестовых вариантов беспилотных автомобилей показали как большие достижения фирм, участвующих в разработке и экспериментальной апробации (Tesla, Google, Uber, Daimler, и т.д.), так и узкие места и проблемы. Широкое применение методов, основанных на использовании нейронных структур, наряду с большими достижениями, указали на необходимость системы логического контроля и оценки результатов, выдаваемых этими структурами. Подобная система в виде так называемого здравого смысла существует в человеческом сознании. Автоматическая система глобального анализа изображений может быть его эквивалентом в системах управления беспилотными автомобилями. Эта система призвана оценивать реалистичность полученного решения (или вырабатывать его самого) и оценить динамику изменения решения по кадрам. Метод геометризованных гистограмм [5, 6] представляет существенную информацию об изображении в сжатом виде. Изображение из миллионов пикселов описывается несколькими сотнями цветовых сгустков, образующих граф *STG*. С помощью этого представления в реальном времени продуцируется большое число частей реальных объектов, у которых описывается геометрическая форма и яркостно-цветовые характеристики. При этом удается одновременно продуцировать части как больших объектов (дорога, обочина, автомобили), так и очень мелких (сигнальные зоны автомобилей, вертолетов, сигналы светофоров) [5–8]. Сама по себе пиксельная сегментация изображений, даже

очень хорошая с точки зрения человека-эксперта, не дает возможности прямо использовать ее в автоматических системах понимания изображений. Если сегментация не принимает во внимание геометрии присоединяемых областей, а только яркостно-цветовые характеристики, то она приведет к большим ошибкам на реальных изображениях. Сегментация должна быть технологична, т.е. геометрия обязательно должна приниматься во внимание и должны быть возможности быстрого совместного анализа различных частей изображения (даже удаленных). В этом смысле метод геометризованных гистограмм есть пример технологичной сегментации.

В работе [9] предложен метод оценки геометрии найденных частей и предлагается метод глобального анализа кадра. Эта техника дает базу для построений систем понимания изображений. В [9] предлагается метод построения системы для анализа положения дороги и обочины в кадре. В настоящей статье дается краткое изложение схемы построения систем понимания изображений на основе метода геометризованных гистограмм, и намечается применения разработанной техники для нахождения на дороге других автомобилей.

Новый метод содержательного описания цветных изображений: выделение ключевых объектов в дорожных сценах

Предлагаемые алгоритмы понимания дорожных сцен основаны на методе геометризованных гистограмм, разработанном в [5–7, 9]. С помощью техники, описанной в [5–7], каждому цветному изображению ставится в соответствие структурный граф цветовых сгустков *STG*. Чтобы построить *STG* изображение разбивается на полосы одинаковой ширины St_n, со сторонами параллельными горизонтальной или вертикальной оси плоскости изображения *Os*. Вводится понятие геометризованной гистограммы изображения [5, 6], которая является далеким обобщением обычной гистограммы. Однако обычная гистограмма является слабым инвариантом изображения, так как она остается инвариантной при любом взаимо-однозначном преобразовании прямоугольника изображения. В ней совершенно не учитывается геометрия объектов изображения. В то время как геометризованная гистограмма остается инвариантной только относительно преобразований внутри полос, при которых точки передвигаются перпендикулярно оси *Os*. Так как мы имеем дело с узкими полосами, эти преобразования почти не меняют геометрии объектов, принадлежащих изображению. Геометризованная гистограмма достаточно точно описывает распределение значений функции, задающей изображение в прямоугольнике изображения. Используя геометризованную гистограмму, получается описание изображения множеством цветовых сгустков. Каждый цветовой сгусток *b*, принадлежащий полосе St_n, характеризуется следующими параметрами:

1. интервал геометрической локализации $[beg_b, end_b]$ – начало и конец *b* на оси *Os*, который характеризует расположение цветового сгустка в полосе;
2. $\Delta_H^b = [H_{min}^b, H_{max}^b]$ и H_{mean}^b – диапазон и среднее значение цветового оттенка *b*;
3. $\Delta_S^b = [S_{min}^b, S_{max}^b]$ и S_{mean}^b – диапазон и среднее значение цветового насыщения данного сгустка;
4. $\Delta_I^b = [I_{min}^b, I_{max}^b]$ и I_{mean}^b – диапазон и среднее значения полутоновой компоненты;
5. мощность сгустка $Card^b$ (это приблизительно число точек полосы, координата которых вдоль полосы ограничена значениями концов интервала геометрической локализации $[beg_b, end_b]$, с цветовыми характеристиками, принадлежащими диапазонам Δ_H^b, Δ_S^b и Δ_I^b).

Цветовые сгустки являются вершинами графа *STG*. 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 отрезков 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. Описание изображений с помощью цветовых сгустков сжимает информацию об изображении с миллионов пикселов до нескольких сотен сгустков.

На множестве цветовых сгустков строится “решетка поиска” SeachLat (*STG*) [9], 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 [9], 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 SeachLat (*STG*) [9]. Многие задачи по поиску ориентиров и объектов в кадре, можно переформулировать строго как задачи поиска некоторых абстрактных объектов на графе цветовых сгустков.

Для этих целей в [6, 7] введены понятия левых и правых контрастных кривых на *STG* и определен двудольный граф левых и правых контрастных кривых *LRG*. Если изображение разбито на горизонтальные полосы, то, неформально, левая или правая контрастная кривая есть цепочка цветовых сгустков в соседних полосах с подобными цветовыми характеристиками. При этом левые или правые концы цветовых сгустков меняются от полосы к полосе "непрерывно", и соседние в той же полосе слева или справа цветовые сгустки имеют контрастные цветовые характеристики. Эта цепочка строится снизу вверх, переходя из полосы в полосу [6, 7].

Используя SeachLat (*STG*), строятся объекты нового типа на *STG*. Эти объекты называются контурами на *STG* с достаточно большим углом наклона относительно оси *Os*. При разбиении изображения на горизонтальные (вертикальные) полосы (ось *Os* – горизонтальная (вертикальная)) получаются контура близкие к вертикальным (горизонтальным) на изображении. Введение таких контуров мотивировано тем, что ввиду сложного освещения на реальных сценах и наличии предметов из металла и стекла (автомобили), реальные интересные объекты могут разбиваться на большое число сравнительно однородных частей в смысле яркостно-цветовых характеристик. Также тонкие предметы типа столбов, столбиков, стволов деревьев трудно обнаружить в качестве однородных объектов, представленных левыми и правыми ростками глобальных объектов. Однако вводимые контура позволяют их локализовать. Границы этих объектов могут разбиваться на много левых и правых контрастных кривых. Контура с достаточно большим углом наклона (дальше, просто контура) по-прежнему ограничивают некоторые области, но уже распадающиеся на относительно много однородных частей. Эти контура объединяют соответственные левые (правые) контрастные кривые, ограничивающие данные однородные части.

Дадим определение контуров на графе цветовых сгустков *STG*. Эти контура образуются левыми (правыми) концами базисных цветовых сгустков, принадлежащих решетке поиска SeachLat. Для каждой строки заводится массив *Loc*[*i*] длиной DimX/*k*, где DimX – размерность массива изображения по горизонтали (рассматривается разбиение изображения на горизонтальные полосы), а *k* – коэффициент сжатия (например, *k* = 4). В каждой точке *i*, *l*[*i*] = *b*, где *b* номер базисного сгустка, чей интервал локализации проходит через точку *ki* средней линии соответствующей полосы. Рассмотрим некоторую полосу St_k. Пусть b_k – некоторый цветовой базисный сгусток этой полосы с интервалом локализации [beg_{bk}, end_{bk}]. Полосы изображения нумеруются снизу вверх. Рассмотрим следующую полосу St_{k+1}. Используя массив *Loc*[*i*] следующей полосы, находим базисный цветовой сгусток, который проходит через beg_{bk} (end_{bk}) в соседней полосе. После этого, двигаясь по SeachLat, находим цветовой сгусток b_{k+1} такой, что расстояние между beg_{bk} (end_{bk}) и $beg_{b(k+1)}$ ($end_{bk(k+1)}$) имеет минимальное значение. Если это расстояние меньше некоторой константы ограничивающей угол смещения, контур продолжается в b_{k+1}. При продолжении по левым концам получаются левые контура, при продолжении по правым – правые. Для контура диной *n* вводятся две числовые характеристики:

1. максимальное уклонение от вертикали $dmax = max_i \, \mathrm{abs}(end_{bk} - end_{bk+i})$ и
2. тотальное отклонение от вертикали $dtot = \mathrm{abs}(end_{bk} - end_{bk+n})/\mathrm{n}$.

Определение. Контур называется близким к перпендикулярному к оси *Os*, если *dmax* и *dtot* ограничены некоторыми относительно небольшими константами.

На Рис. 1 приводится пример построения контуров для изображения дорожной сцены при разбиении изображения на горизонтальные полосы. Если два контура близкие к перпендикулярным к оси *Os* (далее, просто контура) ограничивают некоторый реальный объект на изображении, то они должны быть пространственно связаны. Например, они должны сильно пересекаться. Введем некоторую технику, которая позволит определять пространственно-связанные контура.

Пусть $L = \{1,\ldots N\}$ – множество, нумерующее полосы разбиения изображения. Каждому контуру *K* ставится в соответствие сегмент $I_K \subset L$, концы которого определяются первой и последней полосами данного контура *fs*(*K*) и *ls*(*K*). Для любых двух контуров K_1 и K_2 можно определить сегмент их пересечения $I_{12} = I_{K1} \cap I_{K2}$. Поставим в соответствие двум пересекающимся контурам следующие числа:

1. c_1 – доля пересечения I_{12} в I_{K1}; 2. c_2 – доля пересечения I_{12} в I_{K2}. Имеется 4 типа пересечения: 0. $c_1 \geq ½$, $c_2 \geq ½$; 1. $c_1 \geq ½$, $c_2 < ½$; 2. $c_1 < ½$, $c_2 < ½$; 3. $I_{12} = \varnothing$. Обозначим d_{12} расстояние по оси Os между первыми элементами контуров. Контура нумеруются снизу-вверх и слева направо по их первым элементам. Если I_{12} не пусто, то будем говорить, что контура имеют пересечение или пересекающиеся.

Для каждого контура находятся: $f(K)$ – первый контур, пересекающий K; $l(K)$ – последний контур, пересекающий K (при движении снизу вверх); $cll(K)$ – ближайший левый сосед в смысле расстояния d_{12} с пересечением типа 1; $clr(K)$ – ближайший правый сосед в смысле расстояния d_{12} с пересечением типа 1; $mll(K)$ – левый сосед, имеющий максимальное пересечение с ним в смысле c_1; $mlr(K)$ – правый сосед, имеющий максимальное пересечение с ним в смысле c_1.

Для того, чтобы учесть возможность распада контуров реального объекта из-за отсутствия контраста в некоторых полосах между объектом и его окружением, для каждого контура определяются его ближайший верхний и нижний соседи $up(K)$ и $lw(K)$. Предположим, что один из контуров лежит ниже другого. Пусть $ls(K_2) < ls(K_1)$. Предположим, что $\text{abs}(ls(K_2) - fs(K_1)) < C_1$ (контура слабо пересекаются или находятся недалеко друг от друга). Обозначим D_{12} расстояние на оси Os между первым элементом K_1 и последним элементом K_2.

Если это расстояние минимально, то $K_2 = lw(K_1)$ и $K_1 = up(K_2)$.

Рисунок 1 – Контура на графе *STG*

На рисунке 1 контура нанесены синим цветом. Изображены только правые контура. На контура накладываются ограничения, при которых их начало лежит на дороге или в близкой ее окрестности.

Разметка графа *STG* и качественное и семантическое описание геометрии левых и правых ростков глобальных объектов

Через каждый цветовой сгусток может пройти только один левый и один правый росток контрастного объекта [6, 7]. Номера этих ростков записаны в функции $\text{Germ}_{\text{left}}(STG)$ и $\text{Germ}_{\text{right}}(STG)$, определенные на множестве цветовых сгустков при построении левых и правых ростков контрастных объектов. Значение этих функций есть номер соответствующего ростка (или -1, если нет ростка), проходящего через данный сгусток. Для построения систем понимания изображений необходимо дать качественное и семантическое описание каждого ростка. Методы для этого предложены в [9]. Дадим их краткое описание.

Каждый росток глобального объекта имеет линейные и площадные характеристики. Линейные характеристики определяются кривой, определяемой границами интервалов локализации цветовых сгустков, входящих в данный росток. Кроме того сами отрезки заметают некоторую фигуру на плоскости изображения. Для каждой такой фигуры можно определить то, что она находится в

конечной части изображения или исследовать ее поведение на бесконечности, т.е., при движении к верхней границе изображения (предполагается, что это перспективная съемка). Для определения линейных характеристик границы выделяются участки возрастания и убывания координаты x (в системе координат плоскости изображения), на которых угол наклона не превышает определенного значения. Каждый такой участок анализируется на близость к прямолинейному отрезку с помощью изучения гистограмм наклонов ломаной [9]. Также выделяются выпуклые и вогнутые участки. Поэтому каждый левый (правый) росток глобального контрастного объекта можно охарактеризовать с помощью цвета, формы и поведения на бесконечности.

Например, для дорожных сцен получается некоторая предварительная классификация ростков глобальных объектов. Возможные результаты этой предварительной классификации следующие. Объект, задаваемый ростком, является: 1. растительной окрестностью дороги без сходимости на бесконечности и с выходом в области верхней границы кадра (лес), относящейся к левой или правой обочины дороги; 2. растительной окрестностью дороги без сходимости на бесконечности с границами в пределах горизонта (поле), относящейся к левой или правой обочины дороги; 3. растительной окрестностью дороги со сходимостью на бесконечности с границами в пределах горизонта (газон вдоль дороги), относящейся к левой или правой обочины дороги; 4. препятствием или другим участником движения; 5. частью дорожного покрытия, выходящей к левой или правой границе дороги или принадлежащей к ее центральной части.

На основе описания границ ростка, его поведения на бесконечности, цветовых и яркостных характеристик разработана система правил, которая может отнести росток к одному из приведенных типов. Чтобы получить систему понимания изображений для классификации дорожных сцен, включая других участников движения, дополнительно строится система контуров, которые позволяют объединять объекты, распадающиеся на много однородных кусков с разными яркостно-цветовыми характеристиками. Типичными примерами таких объектов являются другие автомобили на дороге, так как они содержат металлические и стеклянные части, которые дают большой вклад в неоднородность.

Глобальный анализ кадра и его роль в построении системы понимания изображений

Используя функции $\mathrm{Germ}_{\mathrm{left}}(STG)$ и $\mathrm{Germ}_{\mathrm{right}}(STG)$ и решетку поиска SeachLat (STG), двигаясь в полосах в порядке их нумерации влево и вправо от сгустка b_j, строим обобщенные графы соседства $\mathrm{Adg}_i(STG)$. При $i = 1$, получаем обычный граф соседства $\mathrm{Adg}(STG)$. Построенные графы соседства позволяют проводить окончательную классификацию дорожной сцены. Покажем, как эта техника применяется для поиска других участников движения. Среди построенных контуров близких к вертикальным, использую введенную выше технику по поиску возможных пар контуров, ограничивающих других участников движения, определяются контура, которые соседствуют с ростками глобальных объектов и которые являются частью дороги или обочины. Такие контура называются контурами внешними слева или справа. Если пара контуров является внешними слева и справа, и они имеют хорошее пересечение в смысле определения приведенного выше, то эта пара подвергается дополнительному анализу с использованием поиска по SeachLat (STG) для нахождению других характеристических частей возможного другого участника движения.

Нахождение характерных зон автомобилей

Вертикальные контура в области дороги являются необходимыми признаками присутствия автомобилей на дороге. Для подтверждения выработанной гипотезы о присутствии автомобиля в данном месте и для анализа поведения других участников движения необходимо также обнаружить другие характерные признаки. Также необходимо выяснить состояние этих автомобилей (стоят, движутся). Для тонкого управления беспилотным автомобилем и предотвращения дорожно-транспортных происшествий необходимо заранее знать намерения других участников движения. Для этих целей производится определение характерных зон автомобилей в области обнаруженных вертикальных контуров. В [8] предложены и описаны алгоритмы нахождения сигнальных зон автомобилей. Та же самая техника применяется для нахождения зон освещения встречного автомобиля (фары, противотуманные фары). Также важными характеристиками автомобиля являются горизонтальные границы его отдельных частей (верхняя и нижняя границы крыши, верхняя и нижняя граница стекол). Так как эти границы связаны с частями автомобилей из металла и стекла, далеко не всегда можно получить их, изучая однородные части, выделенные на изображении (левые и правые ростки контрастных объектов).

Однако если мы рассмотрим структурный граф STG_V, построенный для разбиения изображения на вертикальные полосы применим технику для построения почти вертикальных контуров на *STG*, то получим возможность строить почти горизонтальные контура на изображении. На самом деле, правильно говорить о контурах на *STG* или STG_V приблизительно перпендикулярных к образующим полос разбиения. Имеет место следующий дуализм: контура приблизительно перпендикулярные образующим полос разбиения на *STG* (STG_V) дают почти вертикальные (горизонтальные) контура на изображении. Для снижения вычислительной сложности, мы можем строить контура близкие к горизонтальным только в окрестности выделенных пар вертикальных контуров. Контура близкие к горизонтальным можно использовать для нахождения границ зданий и деталей на них, анализа теней от автомобилей, мостов и переходов через дороги. Отдельный анализ движения автомобиля и его тени позволит избегать курьезных случаев выписывания штрафов водителям автомобилей, чья тень пересекла сплошную линию. Рисунок 2 дает примеры построения почти горизонтальных контуров на изображении с помощью графа STG_V.

Рисунок 2 – Контура на графе STG_V

Программная реализация и экспериментальные результаты

В дополнение к основным программам, реализующим сегментацию изображений на основе метода геометризованных гистограмм и системы понимания изображений для определения границ растительности, неба, дороги в дорожной сцене [9], сигнальных зон автомобилей на дороге [8], написан комплекс программ для выделения границ самих автомобилей и характерных зон и точек на них. Эти комплексы программ основаны на комплексах программ для построения графа *STG* и непрерывных объектов на нем [5–7]. Все системы понимания изображений работают на уровне сжатого описания изображений, обеспечиваемого графом *STG*, без обращения к пиксельному массиву изображения. Это дает возможность решать задачи в реальном времени на стандартных персональных компьютерах.

В настоящее время осуществляется отработка построенных систем понимания изображений на отдельных изображениях и видеопоследовательностях и включение разработанных программ в систему управления движением робота-автомобиля АвтоНива. Результаты обработки помещаются на сайт [10]. Изучаются применения разработанной техники к выделению других интересных объектов.

К этим объектам относятся препятствия в области движения автомобиля. Например, столбы и небольшие столбики, стволы деревьев, которые могут создавать помехи автомобилю при парковке и при маневрировании в узких местах (дворах, на проселочных дорогах). Также на базе предложенной

техники возможен анализ дорожной разметки, дорожных знаков и указателей. Для подготовки к резкому возможному изменению освещенности, данную технику можно применять для определения приближающихся мостов и переходов через дорогу.

Рисунок 3 демонстрирует результаты выбора пар вертикальных контуров для нахождения автомобилей на дороге.

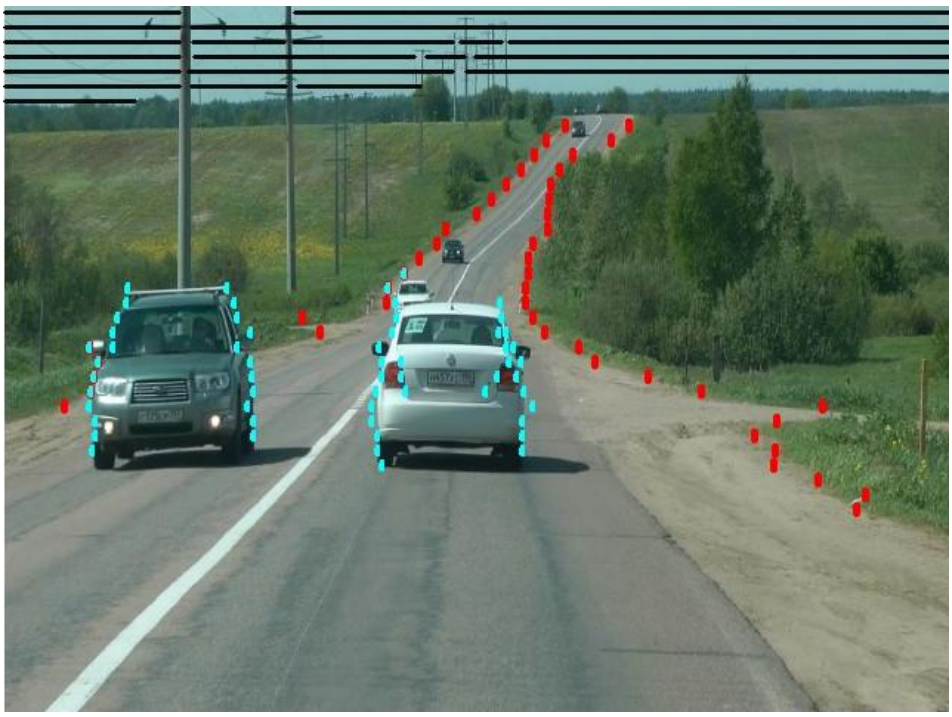


Рисунок 3 – Контура, соответствующие встречному и впередиидущему автомобилям.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований проекты no. 16-08-00880 и 18-07-00127.

1. *S.* Sivaraman, M. M.Trivedi, Looking at vehicles on the road: a survey of vision-based vehicle detection, tracking and behavior analysys // IEEE transactions on intelligent transportation systems, 2013, vol. 14, N. 4, 1773-1795.
2. L.-Ch. Chen, G. Papandreou, I. Kokkinos, K. Murphy, and A. L. Yuille, DeepLab: Semantic Image Segmentation with Deep Convolutional Nets, Atrous Convolution, and Fully Connected CRFs, https://arxiv.org/pdf/1606.00915.
3. M. Teichmann, M. Weber, M. Zollner, R. Cipolla, and R. Urtasun, Multinet: Real-time joint semantic reasoning for autonomous driving, Computing Research Repository, CoRR, abs/1612.07695, 2016. URL http://arxiv.org/ abs/1612.07695.
4. J. M. Alvarez and A. M. Lopez, Road detection based on illuminant invariance // IEEE Trans. Intell. Transp. Syst., 2011, 1 (12), 184-193.
5. 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.
6. 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.
7. K.I. Kiy, A new real-time method of contextual image description and its application in robot navigation and intelligent control, in *Computer Vision in Control Systems-2. Innovations in Practice*, Springer, Intelligence Systems Reference Library. Vol. 75, Ch. 5. P. 109-133. 2015.
8. К.И. Кий, Алгоритмы компьютерного зрения для анализа сигнальных объектов в дорожной сцене // Робототехника и техническая кибернетика, 2018, 1(18), с. 26-33.
9. 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, в печати.
10. http://video.mail.ru/ kikip_46/_myvideo.

E.B. Mustafina

PROSPECTS FOR APPLICATION OF GENERATIVE ADVERSARIAL NETWORKS IN ROBOTICS

Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics, Saint-Petersburg
e.mustafina@rtc.ru

Abstract

Generative adversarial network (GAN) is promising and rapidly evolving type of deep neural net architectures [1].

Generative adversarial network is an algorithm used in unsupervised machine learning and implemented by a system of two neural networks: one neural network, called the generator (G), generates new data instances, while the other, the discriminator (D), tries to identify inputs coming from the generator as fake. To train a generative network: firstly, a large amount of data in some domain should be collected (for example, images, sounds, trajectories, etc.), and then training a model to generate new data can be started.

The most popular application of the Generative adversarial networks in robotics is generating new samples for datasets in data-limited situations.

Generative adversarial networks can be used for recognizing objects which are unknown to the system. In [2] robot generates the unfamiliar object according to the given semantic description and then tries to find the object which looks the most like the imagined object in its field of view.

Some works are focused on Imitation Learning – the problem of learning to perform a task from expert demonstrations, in which the learner is given only samples of trajectories from the expert, and is not allowed to query the expert for more data while training. For example it is possible to clone human behavior in competitive games [3]. Similarly, any control actions can be reproduced.

Key words: neural networks, generative adversarial network, GAN, machine learning.

Э.Б. Мустафина

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ГЕНЕРАТИВНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В РОБОТОТЕХНИКЕ

ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург
e.mustafina@rtc.ru

Аннотация

Генеративно-состязательные сети (Generative adversarial network, GAN) являются очень перспективной и быстро развивающейся категорией искусственных нейронных сетей [1]. Генеративно-состязательная сеть представляет собой алгоритм машинного обучения без учителя, построенный на комбинации из двух нейронных сетей, одна из которых (сеть G – generative) генерирует образцы, а другая (сеть D – discriminative) старается отличить правильные («подлинные») образцы от неправильных. Процесс обучения генеративной сети выглядит так: собирается достаточно большой массив каких-либо данных (например, изображений, звуков, траекторий и т. д.), а затем сеть обучается генерировать такие данные самостоятельно. Наибольшее распространение в робототехнике получило применение генеративных сетей в создании дополнительных образцов для обучающих выборок. Генеративные сети могут быть использованы для распознавания неизвестных системе объектов. Например, алгоритм распознавания на основе семантического описания – сеть генерирует предполагаемое изображение объекта по новому описанию, не присутствующему в обучающей выборке, и ищет этот объект в поле зрения робота. Проводятся исследования в области имитационного обучения выполнению определенной задачи на основе экспертных демонстраций, при этом обучающемуся предоставляются только экспертные траектории и не предусмотрена возможность запроса у эксперта дополнительной информации в процессе обучения. Например, воспроизведено естественное поведение человека в соревновательной игре. Аналогичным образом могут быть воспроизведены любые управляющие воздействия.

Ключевые слова: нейронная сеть, генеративные модели, машинное обучение.

Идея состязательного обучения была выдвинута Ли, Гаучи и Гроссом в 2013 году [2]. Этот метод называется также «обучением Тьюринга».

Рассмотрим большую коллекцию изображений, например, 1,2 миллиона изображений в наборе данных ImageNet. Это может быть и обширная коллекция изображений или видеороликов, полученных из Интернета или от поисковых роботов. Если изменить размер каждого изображения так, чтобы его ширина и высота равнялись 256 (номинальный размер), набор данных будет представлять собой один большой блок пикселей размером 1.200.000x256x256x3 (весом примерно 200 Гб). Эти изображения являются примерами того, как выглядит наш визуальный мир, их называют «образцами из истинного распределения данных». Теперь можно создать генеративную модель, которую можно было бы обучать генерировать подобные изображения с нуля. В частности, генеративной моделью в этом случае может быть одна большая нейронная сеть, создающая изображения, которые называют «образцами из модели».

Базовая архитектура GAN

Предположим, что только что инициализированная сеть использована для генерации 200 изображений, начиная каждый раз с нового случайного кода. Задача состоит в том, чтобы настроить параметры сети так, чтобы побудить ее в будущем создавать несколько более правдоподобных образцов. Причем речь идет не о простой контролируемой настройке. Для этих 200 генерируемых изображений нет никаких явных желаемых требований, кроме того, чтобы они выглядели как настоящие. Один из удачных подходов к решению этой задачи – следовать алгоритму генеративно-состязательной сети (Generative adversarial network, GAN). Для этого нужно ввести вторую сеть-дискриминатор (как правило, это стандартная сверточная нейронная сеть), которая попытается определить, является ли входное изображение настоящим или сгенерированным (схема представлена на Рисунке 1) [3].

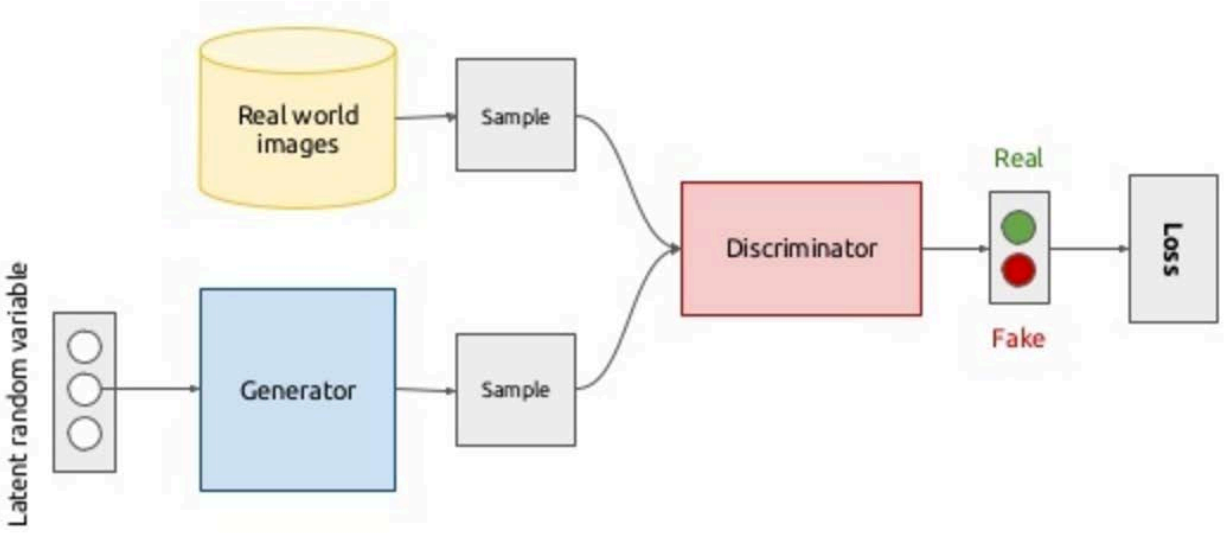


Рисунок 1 – Схема GAN

Например, можно вводить в сеть-дискриминатор 200 сгенерированных и 200 реальных изображений и обучать ее подобно стандартному классификатору различать два вида изображений по источнику. Идея в том, чтобы помимо этого применить метод обратного распространения ошибки к обеим сетям, дискриминатору и генератору, и таким образом узнать, как изменить параметры генератора, чтобы он мог усложнить дискриминатору распознавание своих 200 образцов. Таким образом, эти две сети вступают в противоборство: дискриминатор пытается отличить реальные изображения от поддельных, а генератор пытается создать образы, которые дискриминатор примет за реальные. В итоге сеть-генератор научится выводить изображения, неотличимые для дискриминатора от настоящих.

Сеть-генератор начинает с шумных и хаотичных образцов, но со временем сосредотачивается и получает более правдоподобную статистику изображения.

Такие модели обычно имеют всего около ста миллионов параметров, поэтому сеть, обучаемая на ImageNet, должна сжимать (с потерями) 200 Гб пиксельных данных до 100 Мб. С этой целью модель стремится выявить наиболее характерные особенности данных: например, она может узнать, что пиксели, находящиеся рядом, могут быть одного цвета, или что мир состоит из горизонтальных или вертикальных рядов пикселей или разноцветных пятен. С течением времени модель может обнаружить множество более сложных закономерностей: определенные типы фонов, объектов, текстур, встречающихся в определенных прогнозируемых сочетаниях, или постепенно трансформирующихся в видео, и т. д.

Визуализация процесса сходимости представлена на рисунке 2.

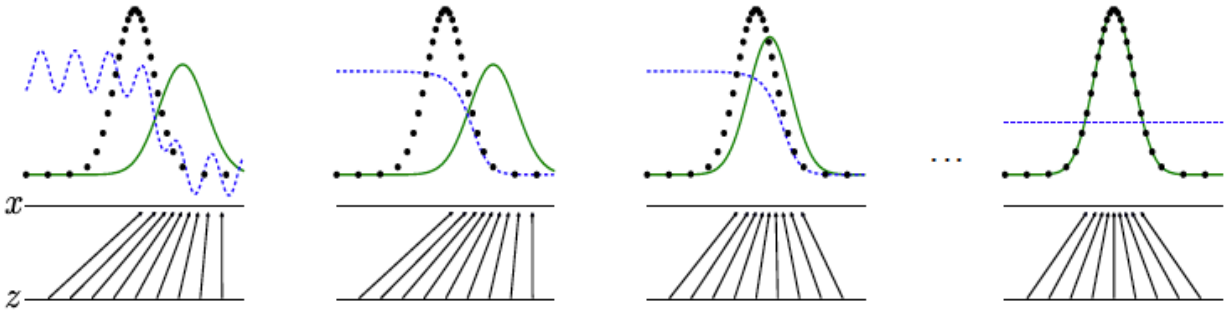


Рисунок 2 – Процесс сходимости распределений

Использованы следующие условные обозначения:

– линия из черных точек – это распределение данных p_{data}, к которому должны приблизиться результаты, полученные нейросетью;

– зеленая линия – это распределение генератора p_{gen}, в процессе обучения оно приближается к распределению данных (обучение происходит последовательно);

– синяя линия – это разделяющая поверхность дискриминатора, который в конце обучения не может отличить примеры из реального набора данных от подделки, созданной генератором;

– стрелками показано отображение x=G(z), которое ставит в соответствие каждому значению из распределения данных точку из априорного распределения.

Генерация 3D объектов

В работе [4] представлена сеть 3D Generative Adversarial Network (3D-GAN), позволяющая генерировать 3D объекты из вероятностного пространства с помощью объемных сверточных и генеративно-состязательных сетей.

Генератор G сопоставляет 200-размерный скрытый вектор z, случайным образом сгенерированный из вероятностного скрытого пространства, с 64*64*64 кубом, представляющий объект G(z) в 3D воксельном пространстве. Дискриминатор D выдает значение D(x), определяющее является ли 3D объект реальным или искусственным.

В качестве классификатора потерь использует перекрестная бинарная энтропия, а общая функция потерь вычисляется по следующей формуле:

$$L_{3D-GAN} = \log D(x) + \log\Big(1 - D\big(G(z)\big)\Big), \quad (1)$$

где x – это реальный объект в 64*64*64 пространстве,

z – случайным образом сгенерированный с помощью распределения p(z) вектор шума.

Для генерирования 3D объектов используется нейронная сеть, состоящая только из сверточных слоев. Как показано на Рисунке 3, генератор состоит из пяти объемных свёрточных слоев с размером ядра 4*4*4, шагом 2 и нормализацией батчей, также присутствуют промежуточные ReLU слои и один Сигмоид слой в конце. Дискриминатор почти повторяет структуру генератора за исключением использования Leaky ReLU слоев вмето ReLU. В структуре отсутствуют объединяющие их линейные слои.

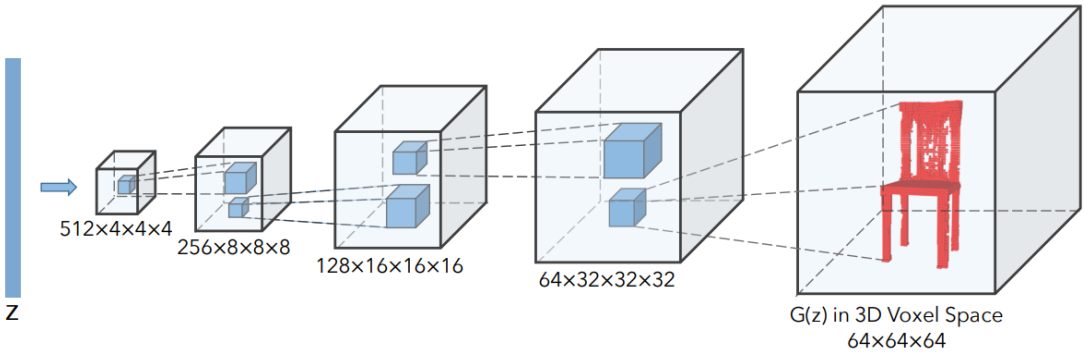


Рисунок 3 – Генератор 3D-GAN

На Рисунке 4 представлен пример создания 3D объектов на основе арифметических операций, так называемой генеративной арифметики.

Рисунок 4 – Пример генеративной арифметики

Распознавание неизвестных объектов

Если дать описание объекта человеку (например, «маленькая желтая птица с черными крыльями»), то он может представить себе этот объект, основываясь на своих знаниях, даже если никогда не видел точно такой же ранее, а затем определить, какой объект из тех, что он сейчас видит, наиболее вероятно похож на искомый. На основе этой идеи в работе [5] предложен алгоритм, названный Генеративным поиском. Этот алгоритм позволяет роботу обнаруживать объекты, которые не входили в его обучающую выборку. Основная сложность заключается в том, чтобы робот смог «представить» незнакомый искомый объект в соответствии с данным описанием. Для решения этой задачи используется генеративная сеть. Созданное сетью изображение сравнивается с объектами вокруг робота с помощью извлечения характерных особенностей другой глубокой нейронной сетью.

На Рисунке 5 представлена схема алгоритма Генеративного поиска объектов, который можно разделить на три части:

– Генерация изображения – создается изображение объекта, который предположительно будет соответствовать сложному описанию на естественном языке. Например, робот был обучен на наборе, состоящем из «птиц с черными крыльями» и «птиц с острым клювом». Теперь робот должен обнаружить объект, соответствующий описанию «птица с черным клювом», для создания изображения такого объекта используется генеративная сеть.

– Поиск совпадений на изображениях в поле зрения робота – сегментируются все возможные области объектов и вычисляется сходство с помощью эвклидова расстояния между этими областями и сгенерированным изображением.

– Определение интересующих областей – не всегда изображений, полученных роботом в данный момент, достаточно для точного детектирования объектов, иногда требуется подъехать поближе или отмасштабировать изображение. На этом этапе алгоритма определяется найден ли объект (точное совпадение) или найден только похожий, «интересный» объект, который надо тщательнее рассмотреть.

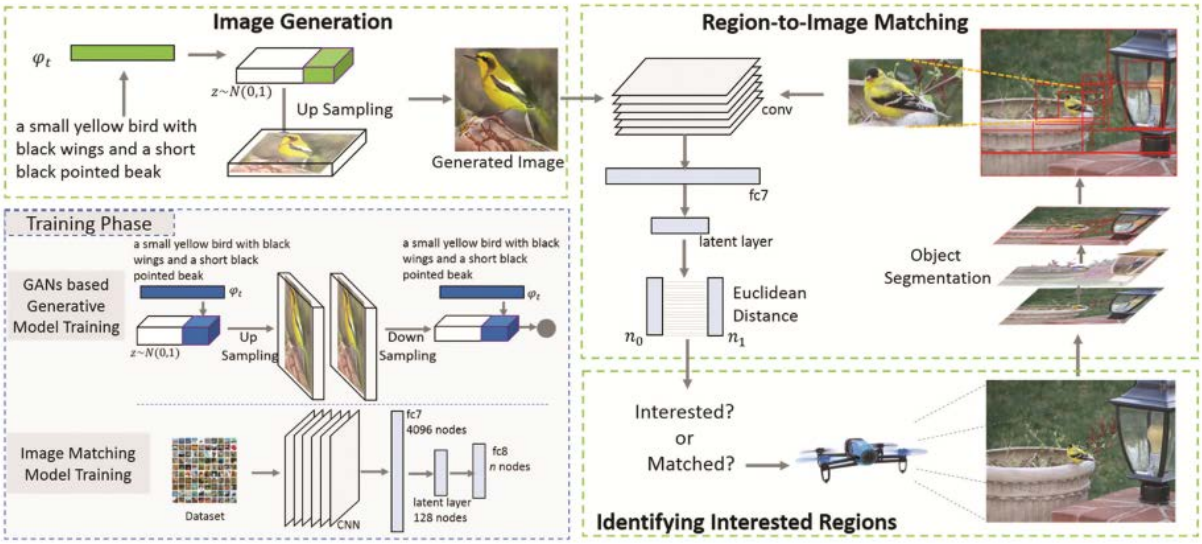


Рисунок 5 – Алгоритм Генеративного поиска объектов

Имитация поведения

Рассматривается задача обучения выполнению определенной задачи на основе экспертных демонстраций, при этом обучающемуся предоставляются только экспертные траектории и не предусмотрена возможность запроса у эксперта дополнительной информации в процессе обучения.

Джонатан Хо и его коллеги представили новый подход к имитационному обучению - генеративное состязательное имитационное обучение (Generative Adversarial Imitation Learning) [6]. Стандартная схема обучения с подкреплением обычно требует разработки функции вознаграждения, которая описывает желаемое поведение агента. Однако на практике это может оказаться довольно дорогостоящим процессом и на пути к правильному результату будет множество проб и ошибок. В то же время при имитационном обучении агент учится путем демонстрации примеров (например, посредством дистанционного управления в робототехнике), что устраняет необходимость разработки функции вознаграждения.

Наиболее популярные методы имитационного обучения включают в себя двухступенчатый процесс, первым шагом которого является изучение функции вознаграждения, а вторым – самообучение с подкреплением в виде этого вознаграждения. Такой процесс может занимать много времени, и из-за его опосредованного характера трудно гарантировать, что принятая в итоге стратегия принесет нужные результаты. В исследовании показано, что стратегии можно напрямую извлекать из данных посредством объединения с GAN.

Отдельно можно выделить исследования в области применения генеративно-состязательных нейронных сетей в задачах автономного вождения. Здесь можно выделить следующие направления:

– Создание нейросетевых решений, решающих задачу целиком (end-to-end) [7,8,9]. Одним из первых решений в этой области можно выделить продукт Comma`AI [10].

– Синтез размеченных обучающих выборок и их расширение (аугментация) для обучения задачам обнаружения и сегментации участников дорожного движения и объектов дорожной обстановки. Такие решения применимы не только в задачах автономного вождения [11].

– В работе [12] применили генеративные состязательные сети для имитации поведения водителя. Способность точно предсказывать и имитировать поведение водителя очень важно при разработке интеллектуальной системы транспортного средства. Обычно используются простые параметрические системы и копирование поведения в определенных сценариях. Модель водителя, использующая генеративные состязательные сети, превосходит модели, основанные на наборе правил, и демонстрирует максимальное сходство с реальными водителями на трассе. Модель воспроизводит поведение в штатной ситуации при движении на большие расстояния и реакции водителя в экстренных ситуациях.

Преобразование изображений

Множество задач обработки изображений, компьютерной графики и технического зрения можно считать преобразованием исходного изображения в соответствующее выходное. Точно также как

фраза может быть написана по-английски или по-французски, изображение может быть представлено в привычном RGB виде, полем градиентов, содержать только контуры объектов, их тепловую карту или семантические метки. По аналогии с автоматическим переводом текста с одного языка на другой здесь может быть реализовано преобразование изображений из одного вида к другому с помощью генеративных состязательных нейронных сетей. Это позволяет получить больше информации по единственному изображению. В работе [13] проведено множество таких экспериментов:

– Создание изображения по семантическому описанию, и наоборот

– Создание изображения по архитектурным меткам

– Создание изображений «со спутника» по карте местности, и наоборот (результаты представлены на Рисунке 6)

– Создание цветной версии черно-белого изображения (результаты представлены на Рисунке 7)

– Создание изображения объекта по контурам, полученным автоматическим детектированием с помощью HED детектора

– Создание изображений по зарисовкам

– Создание ночного изображения по дневному

– Создание цветного изображения по тепловому (результаты представлены на Рисунке 8)

– Восстановление поврежденного изображения с недостающими пикселями

Рисунок 6 – Пример работы системы на данных Google Maps. Обучение на изображениях с разрешением 256x256, тестирование на изображениях с разрешением 512x512

Рисунок 7 – Примеры создания цветных изображений по черно-белому образцу. Левый и средний столбцы – полученные с помощью нейронной сети изображения при разных настройках; правый столбец – реальные цветные версии черно-белых исходных изображений.

Рисунок 8 – Примеры преобразования тепловых изображений в RGB

На Рисунке 9 представлены результаты экспериментов пользователей Twitter на основе pix2pix. Слева показан самый популярный эксперимент – создание кошек по заданным очертаниям; справа – удаление фона, создание палитр, копирование заданной позы и создание карандашных, акварельных рисунков и даже картин маслом по наброскам.

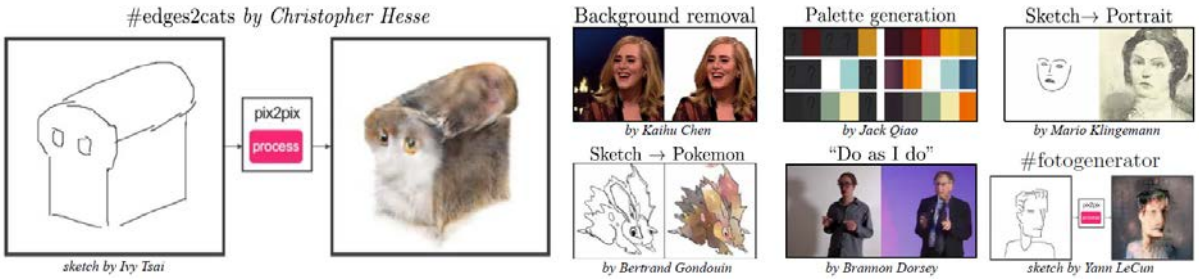


Рисунок 9 – Примеры экспериментов с созданием изображений

Преобразование и создание изображений с помощью генеративно-состязательных сетей на данный момент лидирует по количеству экспериментов и исследований. Многие из них преследуют чисто научный или развлекательный интерес, но есть и реально применимые, такие как восстановление поврежденных изображений с помощью заполнения недостающих пикселей и целых кусков изображений. Туда же можно отнести обработку видеопоследовательностей с низкой частотой кадров – генеративно-состязательная сеть позволяет предсказывать и создавать недостающие кадры.

1. Goodfellow, I. et al: Generative Adversarial Nets, Advances in neural information processing systems, pp. 2672-2680 (2014).
2. Wei Li, M. Gauci, R.Gross. A Convolutionary Approach to Learn Animal Behavior Through Controlled Interaction. Proceedings of the 15th annual conference on Genetic and evolutionary computation, Amsterdam, The Netherlands, July 06 - 10, 2013, pp 223-230.
3. Goodfellow, Ian J., Pouget-Abadie, Jean, Mirza, Mehdi, Xu, Bing, Warde-Farley, David, Ozair, Sherjil; Courville, Aaron & Bengio, Yoshua. Generative Adversarial Networks.2014 Cornell University Library arXiv:1406.2661.
4. Wu, Jiajun & Zhang, Chengkai & Xue, Tianfan & T. Freeman, William & B. Tenenbaum, Joshua. (2016). Learning a Probabilistic Latent Space of Object Shapes via 3D Generative-Adversarial Modeling.
5. Che, Huimin & Hu, Ben & Ding, Bo & Wang, Huaimin. (2017). Enabling Imagination: Generative Adversarial Network-Based Object Finding in Robotic Tasks. Neural Information Processing: 24th International Conference, ICONIP 2017, Guangzhou, China, November 14–18, 2017, Proceedings, Part VI, pp.100-110.
6. Jonathan Ho, Stefano Ermon. Generative Adversarial Imitation Learning. In: Advances in Neural Information Processing Systems (2016), pp. 4565–4573.
7. Arna Ghosh, Biswarup Bhattacharya, Somnath Basu Roy Chowdhury. SAD-GAN: Synthetic Autonomous Driving using Generative Adversarial Networks, arXiv:1611.08788 (2016).
8. Mehdi Rezagholizadeh, Md Akmal Haidar. Semi-supervised Regression with Generative Adversarial Networks for End to End Learning in Autonomous Driving. The 6th International Conference on Learning Representations, April 30 - May 3, 2018. ICLR 2018 Conference Track (2018).
9. Hesham M. Eraqi, Mohamed N. Moustafa, and Jens Honer. End-to-End Deep Learning for Steering Autonomous Vehicles Considering Temporal Dependencies. 31st Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS), arXiv:1710.03804 (2017).
10. Eder Santana, George Hotz. Learning a Driving Simulator, arXiv:1608.01230 (2016).
11. Antreas Antoniou, Amos Storkey, Harrison Edwards. Data Augmentation Generative Adversarial Networks, arXiv:1711.04340 (2018).
12. Alex Kuefler, Jeremy Morton, Tim Wheeler, Mykel Kochenderfer: Imitating Driver Behavior with Generative Adversarial Networks, arXiv:1701.06699 (2017).
13. Phillip Isola & Jun-Yan Zhu & Tinghui Zhou & Alexei Efros, "Image-to-Image Translation with Conditional Adversarial Networks" Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (2017).

I.S. Ozhmegov[1], R.R. Khazanskii[2]

COMPRESSION OF STREAMING VIDEO FROM A GROUND ROBOT'S CAMERA FOR COMMUNICATION CHANNELS WITH LOW BANDWIDTH

[1]SPbPU, [2] Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics, Saint-Petersburg
elijahozhmegov@gmail.com, r.hazansky@rtc.ru

Abstract

This article describes lossy video compression algorithms based on reducing colour depth to 1 bit and compares various methods of video compression.

Key words: lossy video compression, lossless video compression, edge detection, dithering

И.С. Ожмегов[1], Р.Р. Хазанский[2]

СЖАТИЕ ПОТОКОВОГО ВИДЕО С КАМЕРЫ НАЗЕМНОГО РОБОТА ДЛЯ КАНАЛОВ СВЯЗИ С НИЗКОЙ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТЬЮ

СПбПУ, ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург
elijahozhmegov@gmail.com, r.hazansky@rtc.ru

Аннотация

В статье описаны алгоритмы, уменьшающие объем изображения видеопотока за счет использования одного цветового канала глубиной в 1 бит, также проведен сравнительный анализ различных методов сжатия видеопотока.

Ключевые слова: сжатие с потерями, сжатие без потерь, выделение границ, псевдотонирование.

Введение

Существующие на сегодняшний день программные решения, которые позволяют транслировать видеопоток с камеры беспилотных летательный аппаратов, зачастую не способны обеспечить стабильный видеопоток, достаточный для управления наземными аппаратами различного назначения. Это обусловлено наличием в среде распространения электромагнитных сигналов наземных аппаратов большого количества препятствий (таких, как деревья, здания и поверхность земли), в результате даже при низком разрешении видеопоток может иметь низкую кадровую частоту или поврежденные кадры. Рис. 1 демонстрирует один из таких поврежденных кадров.

В силу вышеизложенного очевидна необходимость разработки специального программного обеспечения (ПО) передачи видеопотока для наземных аппаратов с дистанционным управлением. Данная статья посвящена вопросу разработке ПО, которое позволило бы транслировать потоковое видео достаточного качества для управления по нему наземным аппаратом

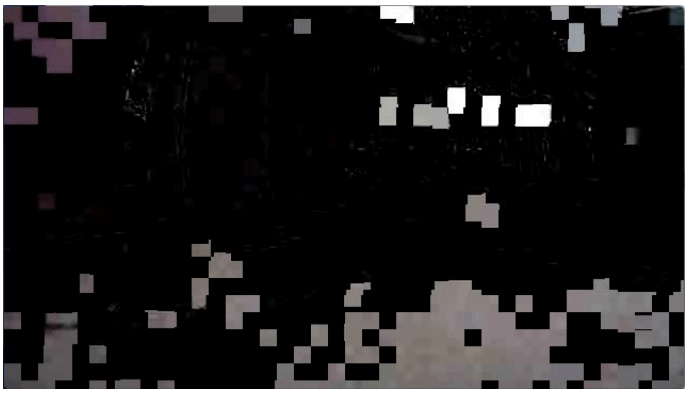


Рисунок 8 – Поврежденный кадр видеопотока

1. Алгоритмы сжатия с потерями

Для выбора алгоритма обработки изображения необходимо его предварительно анализировать и оценить степень возможного «ухудшения», при котором оно продолжает корректно восприниматься

человеком. На рис. 2 представлено изображение, с которым в дальнейшем будут сравниваться его обработанные копии. Это RGB-изображение с глубиной в 8 бит на каждый из 3-х каналов с разрешением 640 x 360 пикселей и тем самым в несжатом состоянии оно занимает объем в 640 x 360 x 3 = 691200 байт.

В дальнейшем нами будут рассмотрены алгоритмы, уменьшающие объем изображения за счет использования одного канала глубиной в 1 бит, поэтому изображения, обработанные каждым из рассматриваемых алгоритмов, будут иметь одинаковый размер в 28800 байт.

Рисунок 9 – Исходное изображение

1.1 Алгоритмы выделения границ

В идеальном случае результатом выделения границ является набор связанных кривых, обозначающих границы объектов, граней и оттисков на поверхности, а также кривые, которые отображают изменения положения поверхностей. Таким образом, применение фильтра выделения границ к изображению может существенно уменьшить количество обрабатываемых данных, поскольку отфильтрованная часть изображения считается менее значимой, а наиболее важные структурные свойства изображения сохраняются. Однако не всегда возможно выделить границы в изображениях (средней сложности) реального мира. Такие границы зачастую могут иметь ряд недостатков: фрагментированность (кривые границ не соединены между собой), отсутствие границ или наличие ложных, не соответствующих исследуемому объекту. Тем не менее существует ряд задач, в которых рассматриваемые алгоритмы обеспечивают приемлемое качество изображения.

1.1.1 Оператор Собеля

Оператор Собеля основан на свертке изображения небольшими сепарабельными целочисленными фильтрами в вертикальном и горизонтальном направлениях, поэтому его относительно легко вычислять. С другой стороны, используемая им аппроксимация градиента достаточно грубая, особенно это сказывается на высокочастотных колебаниях изображения [1].

Оператор вычисляет градиент яркости изображения в каждой точке, – так находится направление наибольшего увеличения яркости и величина ее изменения в этом направлении. Результат демонстрирует, насколько «резко» или «плавно» меняется яркость изображения в каждой точке, а значит, и вероятность нахождения точки на границе и ориентацию границы. На практике вычисление величины изменения яркости (вероятности принадлежности к границе) надежнее и проще в интерпретации, чем расчет направления.

Строго говоря, градиент функции двух переменных (которой и является функция яркости) для каждой точки изображения – это двумерный вектор, компонентами которого являются производные яркости изображения по горизонтали и вертикали. В каждой точке изображения вектор градиента ориентирован в направлении наибольшего увеличения яркости, а его длина соответствует величине изменения яркости. Это означает, что результатом оператора Собеля в точке, лежащей в области постоянной яркости, будет нулевой вектор, а в точке, лежащей на границе областей различной яркости, – вектор, пересекающий границу в направлении увеличения яркости.

Оператор использует ядра 3 x 3, с которыми сворачивает исходное изображение для вычисления приближенных значений производных по горизонтали и по вертикали. Пусть A – это исходное

изображение, а G_x и G_y – два изображения, на которых каждая точка содержит приближенные производные по x и по y. Они вычисляются следующим образом:

$$\mathbf{G_y} = \begin{bmatrix} \mathbf{-1} & \mathbf{-2} & \mathbf{-1} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{+1} & \mathbf{+2} & \mathbf{+1} \end{bmatrix} * \boldsymbol{A}, \qquad \mathbf{G_x} = \begin{bmatrix} \mathbf{-1} & \mathbf{0} & \mathbf{+1} \\ \mathbf{-2} & \mathbf{0} & \mathbf{+2} \\ \mathbf{-1} & \mathbf{0} & \mathbf{+1} \end{bmatrix} * \boldsymbol{A},$$

здесь $*$ обозначает двумерную операцию свертки.

Заметим, что в горизонтальном ядре координата x имеет градиент направленный вправо, а в вертикальном ядре координата y имеет градиент, направленный вниз. В каждой точке изображения приближенное значение величины градиента можно вычислить исходя из полученных приближенных значений производных:

$$\boldsymbol{G} = \sqrt{\boldsymbol{G_x^2} + \boldsymbol{G_y^2}},$$

при этом вычисление производится поэлементно. Далее вычислим направление градиента:

$$\boldsymbol{\theta} = \mathbf{arctan}\left(\frac{\boldsymbol{G_y}}{\boldsymbol{G_x}}\right),$$

где, например, угол $\boldsymbol{\theta}$ равен нулю для вертикальной границы, от которой более темная сторона расположена слева.

Результат применения оператора Собеля показан на рис. 3. Участки с большим значением градиента (в основном, границы) видны как черные линии.

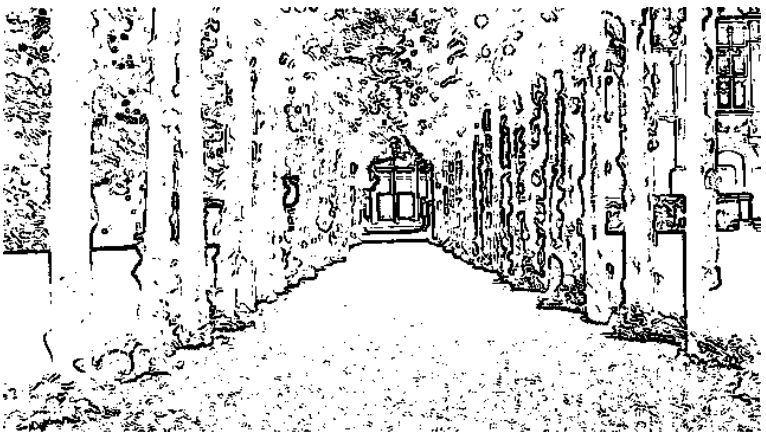


Рисунок 10 – Оператор Собеля, наложенный на исходное изображение

1.1.2 Дискретный оператор Лапласа

Дискретный оператор Лапласа широко применим в обработке изображений, например, в задаче выделения границ или в приложениях оценки движения. Дискретный лапласиан определяется как сумма вторых производных и вычисляется как сумма перепадов на «соседях» центрального пикселя [2].

Для двухмерных изображений лапласиан можно задать как свертку со следующими ядрами:

$$\boldsymbol{D_{xy}^2} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{1} & \mathbf{0} \\ \mathbf{1} & \mathbf{-4} & \mathbf{1} \\ \mathbf{0} & \mathbf{1} & \mathbf{0} \end{bmatrix}, \quad \text{или с диагоналями:} \quad \boldsymbol{D_{xy}^2} = \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{1} & \mathbf{1} \\ \mathbf{1} & \mathbf{-8} & \mathbf{1} \\ \mathbf{1} & \mathbf{1} & \mathbf{1} \end{bmatrix}$$

Результат дискретного оператора Лапласа показан на рис. 4. Участки с большой величиной градиента (в основном, границы) видны как черные линии.

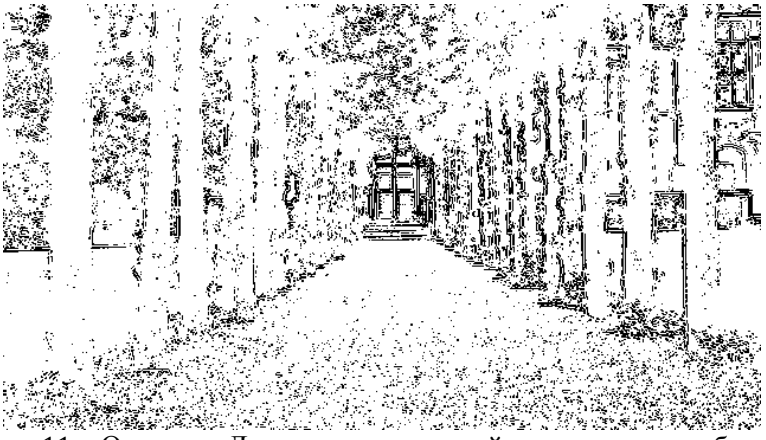


Рисунок 11 – Оператор Лапласа, наложенный на исходное изображение

1.1.3 Детектор границ Кэнни

В отличие от рассмотренных ранее алгоритмов, детектор границ Кэнни не ограничивается вычислением градиента сглаженного изображения. В контуре границы остаются только точки максимума градиента изображения, а остальные, лежащие рядом с границей, точки удаляются. Здесь так же используется информация о направлении границы для того, чтобы удалять точки именно рядом с границей и не разрывать саму границу вблизи локальных максимумов градиента. Затем, с помощью двух порогов, удаляются слабые границы. Фрагмент границы при этом обрабатывается как единое целое. Если значение градиента где-нибудь на прослеживаемом фрагменте превышает верхний порог, то этот фрагмент остается «допустимой» границей и в тех местах, где значение градиента падает ниже верхнего порога, до тех пор, пока граница не опустится до нижнего порога. Если же на всем фрагменте нет ни одной точки со значением, большим верхнего порога, то он удаляется.

Если значение градиента пикселя выше, чем верхнее пороговое значение, то он будет отмечен как часть ярко выраженной границы. Если значение градиента пикселя меньше верхнего порогового значения, но больше, чем нижнее пороговое значение, то он будет отмечен как часть слабовыраженной границы. Если значение градиента пикселя меньше нижнего порогового значения, то он будет «подавлен». Части слабовыраженной границы будут подавлены в том случае, если они не связаны с частями ярко выраженной границы. Два пороговых значения определяются эмпирически, и их значения зависят от содержания входного изображения. Такой гистерезис позволяет снизить число разрывов в выходных границах. Включение в алгоритм Кэнни шумоподавления, с одной стороны, повышает устойчивость результатов, а с другой – увеличивает вычислительные затраты и приводит к искажению и даже потере подробностей границ. Так, например, данным алгоритмом скругляются углы объектов и разрушаются границы в точках соединений [3; 4].

Основные этапы алгоритма:

1) Сглаживание. Размытие изображения для удаления шума. Оператор Кэнни использует фильтр, который может быть приближен к первой производной гауссианы со стандартным отклонением σ = 1.4:

$$\boldsymbol{B} = \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{159}} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{2} & \mathbf{4} & \mathbf{5} & \mathbf{4} & \mathbf{2} \\ \mathbf{4} & \mathbf{9} & \mathbf{12} & \mathbf{9} & \mathbf{4} \\ \mathbf{5} & \mathbf{12} & \mathbf{15} & \mathbf{12} & \mathbf{5} \\ \mathbf{4} & \mathbf{9} & \mathbf{12} & \mathbf{9} & \mathbf{4} \\ \mathbf{2} & \mathbf{4} & \mathbf{5} & \mathbf{4} & \mathbf{2} \end{bmatrix} * \boldsymbol{A}.$$

2) Поиск градиентов. Границы отмечаются там, где градиент изображения принимает максимальное значение. Они могут иметь различное направление, поэтому алгоритм Кэнни использует четыре фильтра для обнаружения горизонтальных, вертикальных и диагональных ребер в размытом изображении:

$$\boldsymbol{G} = \sqrt{\boldsymbol{G_x^2} + \boldsymbol{G_y^2}}, \qquad \boldsymbol{\theta} = \mathbf{arctan}\left(\frac{\boldsymbol{G_y}}{\boldsymbol{G_x}}\right).$$

Угол направления вектора градиента округляется и может принимать значения: 0°, 45°, 90°, 135°.

3) Подавление не-максимумов. Только локальные максимумы отмечаются как границы.

4) Двойная пороговая фильтрация. Потенциальные границы определяются порогами.

5) Трассировка области неоднозначности. Итоговые границы определяются путем подавления всех краев, не связанных с определенными (сильными) границами.

6) Очевидно, что детектор преобразуют изображение в серый, чтобы уменьшить вычислительные затраты. Этот этап характерен для многих методов обработки изображений.

Результат детектора границ Кэнни показан на рис. 5. В отличие от рассмотренных ранее методов, в данном необходимо предварительно выбрать нижний и верхний порог.

1.2 Псевдотонирование

В компьютерной графике псевдотонирование используется для создания иллюзии глубины цвета для изображений с относительно небольшим количеством цветов в палитре. Отсутствующие цвета составляются из имеющихся путем их «перемешивания». Например, чтобы получить отсутствующий в палитре фиолетовый цвет, можно разместить красные и синие пиксели в шахматном порядке; оранжевый цвет может быть составлен из красных и желтых точек [5].

Псевдотонирование прежде всего связано с рассеиванием ошибок. В терминах данной задачи необходимо свести фотографию в градациях серого до черных и белых цветов, чтобы уменьшить глубину изображения до 1 бита [6].

При преобразовании любого пикселя в черный или белый используется следующая формула: значение цвета больше 127, следовательно, пиксель становится белым и ошибка равна разности значения пикселя и 255, иначе – черным и ошибка равна значению этого цвета.

Рассеивание ошибок происходит путем перераспределения ошибки каждого вычисления в соседние пиксели. Если алгоритм находит серый пиксель со значением 96, он также определяет, что 96 ближе к 0, чем к 255, – и поэтому делает пиксель данный черным. Но тогда алгоритм учитывает «ошибку» в его преобразовании. В частности, ошибку в том, что серый пиксель, который стал черным, на самом деле был на «расстоянии» в 96 единиц от черного.

При перемещении к следующему пикселю, алгоритм рассеивания ошибок добавляет ошибку предыдущего пикселя к текущему. Если следующий пиксель так же имеет серый цвет 96, то вместо того, чтобы сделать его черным, алгоритм добавляет ошибку 96 из предыдущего пикселя. Это приводит к значению 192, которое на самом деле ближе к 255, а следовательно, – ближе к белому. Таким образом, алгоритм делает этот пиксель белым и пересчитывает ошибку. В данном случае ошибка составляет 63, так как 192 на 63 меньше, чем 255.

По мере того, как алгоритм обрабатывает каждый пиксель изображения, рассеивание ошибок приводит к чередованию черных и белых пикселей, в результате чего получается имитация серого цвета со значением 96 этого сегмента. Как правило, после завершения обработки строки изображения значение ошибки отбрасывается и процесс начинается заново с нулевой ошибкой на следующей строке изображения.

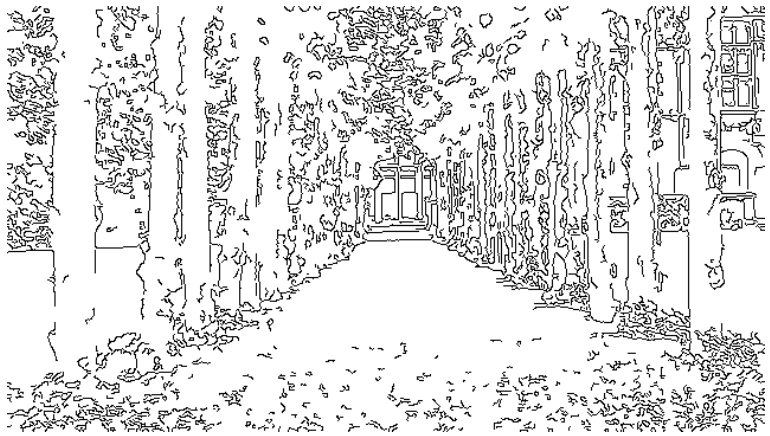


Рисунок 12 – Детектор границ Кэнни, наложенный на исходное изображение

Ниже на рис. 6 показан пример изображения с применением описанного алгоритма. В частности, каждый пиксель преобразуется в черный или белый, ошибка преобразования отмечается и передается следующему пикселю справа. Основная проблема псевдотонирования с рассеиванием ошибок –

заметные точки или пунктирные линии. Это неизбежный побочный эффект работы с небольшим количеством доступных цветов. В данном примере очевидна и другая проблема алгоритма рассеивания ошибок, – при наличии блока похожих цветов и одномерном распространении ошибки, все «точки» оказываются в одном и том же месте. Это приводит к появлению линий, которые могут быть приняты за часть рельефа на изображении. Однако проблему «ложных» линий можно решить путем рассеивания ошибки в нескольких направлениях (вертикальном и горизонтальном). Это распределит ошибку более равномерно, что в свою очередь позволит избежать ложных линий.

Рисунок 13 – Псевдотонирование с одномерным рассеиванием ошибок

1.2.1 Алгоритм рассеивания ошибок Флойда–Стейнберга

Первая и одна из самых известных формул рассеивания двумерных ошибок была опубликована Робертом Флойдом и Луисом Стейнбергом в 1976 г. Рассеивание ошибок происходит по следующей схеме:

$$\begin{bmatrix} \cdots & & * & \frac{7}{16} & \cdots \\ \cdots & \frac{3}{16} & \frac{5}{16} & \frac{1}{16} & \cdots \end{bmatrix}$$

В приведенных выше обозначениях $*$ обозначает текущий пиксель, который находится на -ой строке и j-ом столбце. Дроби, записанные рядом, – это части ошибки текущего пикселя, которые записываются в соседние, т.е. на пиксель $(i,\ j+1)$ приходится не полностью вся ошибка, как в одномерном рассеивании, а только 7/16. Таким образом, на пиксель $(i+1,\ j-1)$ приходится 3/16 ошибки, а на $(i+1,\ j)$ – 5/16 и так далее. На рис. 7 показано изображение, обработанное алгоритмом Флойда-Стейнберга.

Рисунок 14 – Псевдотонирование алгоритмом Флойда-Стейнберга

В примере, который упоминался ранее, преобразование значения пикселя происходит от 96 к 0 (черному) или к 255 (белому). При окрашивании пикселя в черный ошибка получается равной 96.

Распространив эту ошибку окружающим пикселям и поделив 96 на 16, получим 6; затем, умножив ее на соответствующие значения, получим:

$$\begin{bmatrix} \cdots & & & * & \mathbf{+42} & \cdots \\ \cdots & \mathbf{+18} & \mathbf{+30} & \mathbf{+6} & \cdots \end{bmatrix}$$

Путем распространения ошибки нескольким пикселям, каждому с различным значением, все отвлекающие полосы с точками, заметные в исходном примере алгоритма рассеивания ошибок, сводятся к минимуму.

1.2.2 Алгоритм рассеивания ошибок Штуки

Данный алгоритм рассеивания двумерных ошибок был опубликован Питером Штуки в 1981 г., его схема выглядит следующим образом:

$$\begin{bmatrix} \cdots & & & * & \frac{\mathbf{8}}{\mathbf{42}} & \frac{\mathbf{4}}{\mathbf{42}} & \cdots \\ \cdots & \frac{\mathbf{2}}{\mathbf{42}} & \frac{\mathbf{4}}{\mathbf{42}} & \frac{\mathbf{8}}{\mathbf{42}} & \frac{\mathbf{4}}{\mathbf{42}} & \frac{\mathbf{2}}{\mathbf{42}} & \cdots \\ \cdots & \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{42}} & \frac{\mathbf{2}}{\mathbf{42}} & \frac{\mathbf{4}}{\mathbf{42}} & \frac{\mathbf{2}}{\mathbf{42}} & \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{42}} & \cdots \end{bmatrix}$$

На рис. 8 показано изображение, обработанное алгоритмом Штуки. При таком алгоритме ошибка распределяется на втрое большее количество пикселей, чем у алгоритма Флойда-Стейнберга, что приводит к более гладкому и более точному результату. Делитель 42 не является степенью двойки, но значения рассеивания ошибки таковыми являются, поэтому ошибка делится на 42, после чего с помощью сдвигов по битам могут быть получены конкретные значения рассеивания.

Рисунок 15– Псевдотонирование алгоритмом Штуки

1.2.3 Алгоритм рассеивания ошибок Аткинсона

Алгоритм Билла Аткинсона (результат применения алгоритма показан на рис. 9) отличен от других, поскольку распространяет только часть ошибки. Рассеивание лишь части ошибок помогает уменьшить зернистость, но при этом непрерывные светлые и темные участки изображения могут потерять цвет. Схема рассеивания ошибки следующая:

$$\begin{bmatrix} & \cdots & * & \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{8}} & \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{8}} & \cdots \\ \cdots & \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{8}} & \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{8}} & \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{8}} & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{8}} & \cdots & \cdots & \end{bmatrix}$$

Рисунок 16 – Псевдотонирование алгоритмом Аткинсона

2 Анализ алгоритмов сжатия с потерями

В результате уменьшения глубины цвета до 1 бита, вне зависимости от алгоритма сжатия с потерями, объем изображения уменьшается в 24 раза и становится равным 28800 байт. Очевидно, что 1 с видеопотока, состоящего из кадров такого объема, с кадровой частотой 30 кадров/с, имеет объем 30 x 28800 = 864 Кбайт, размер которого превышает доступную пропускную способность. В связи с чем появляется необходимость в применении сжатия без потерь, для этого нами использована стандартная функция compress библиотеки zlib, которая в свою очередь использует модифицированный метод сжатия DEFLATE [7; 8]. Соответствующие результаты представлены в табл. 1. Под степенью сжатия подразумевается отношение несжатого изображения объемом в 691200 байт к сжатому. Предположительный объем 1 с видео получен путем умножения объема изображения после сжатия без потерь на количество кадров в секунде, т.е. на 30.

На основании результатов анализа и сравнении их с наиболее приемлемым уже существующим (JPEG) можно заключить, что все реализованные методы сжимают видео сильнее, чем JPEG. Если проводить оценку только по степени сжатия, то оператор Лапласа обладает самым высоким показателем, поскольку объем секунды видеопотока после его применения составляет 0,11 Мбайт, что является наименьшим объемом из полученных.

Таблица 1. Сравнение алгоритмов сжатия с потерями

Алгоритм сжатия с потерями	**Объем после сжатия с потерями, Кбайт**	**Объем после сжатия без потерь, Кбайт**	**Степень сжатия, раз**	**Предполагаемый объем 1 с видео, Мбайт**
Без сжатия	–	486,2	1,42	14,59
Псевдотонирование	29	15	46,08	0,45
Псевдотонирование Флойда-Стейнберга	29	22	31,42	0,66
Псевдотонирование Аткинсона	29	25	27,65	0,75
Псевдотонирование Аткинсона*	29	21	32,91	0,63
Псевдотонирование Штуки	29	23	30,05	0,69
Оператор Собеля	29	5,5	125,67	0,17
Оператор Лапласа	29	3,6	192,00	0,11
Детектор границ	29	5,4	128,00	0,16

Кэнни				
JPEG	39	–	17,72	1,17

Однако необходимо принять во внимание отчасти такой субъективный критерий методов, как восприятие обработанного изображения человеком. В связи с чем оператор Лапласа, как и другие методы определения границ, имеет очевидный недостаток – существенные потери информации в сравнении с методами псевдотонирования, в результате которых управление по обработанному изображению может быть невозможным, например в случае, если окружающая обстановка робота не знакома осуществляющему управление оператору.

Для получения более достоверных результатов было выбрано тестовое видео длительностью 1 мин 5 с (1564 кадра) разрешением 640 x 360 и частотой 24 кадра/с, которое достаточно правдоподобно отражало реальный видеопоток с камеры наземного робота. Передача видеопотока осуществлялась по протоколу UDP. В результате серии экспериментов получен общий объем прошедшего через канал трафика, куда также входят пакетные заголовки протокола. Данные результаты представлены в табл. 2. Скорость передачи определялась отношением общего объема трафика к длительности тестового видео. Помимо этого, в табл. 2 представлены результаты алгоритмов стандарта H.263P, H.264, MPEG-4 Part 14, которые используют межкадровое сжатие.

Таблица 2. Сравнение алгоритмов сжатия с потерями с помощью тестового видео

Алгоритм сжатия с потерями	**Общий объем трафика, Мбайт**	**Скорость, Мбайт/с**	**Скорость, Мбит/с**
Псевдотонирование	22,71	0,35	2,79
Псевдотонирование Флойда–Стейнберга	35,06	0,54	4,31
Псевдотонирование Аткинсона	36,85	0,57	4,53
Псевдотонирование Аткинсона*	29,73	0,46	3,65
Псевдотонирование Штуки	35,06	0,54	4,31
Оператор Собеля	8,70	0,13	1,07
Оператор Лапласа	7,55	0,12	0,93
Детектор границ Кэнни	8,62	0,13	1,06
JPEG	68,89	1,06	8,46
H.263P	3,66	0,06	0,45
H.264	15,70	0,24	1,93
MPEG–4 Part 14	3,43	0,05	0,42

Настройки библиотечных методов стандартов JPEG, H.263P, H.264 и MPEG-4 Part 14 были установлены по умолчанию.

Для JPEG наиболее значимыми параметрами являются:

– quality – качество кодирования, значение по умолчанию: 85 (из диапазона от 0 до 100);

– idct-method – используемый метод обратного дискретного косинусного преобразования, значение по умолчанию: быстрый, менее точный целочисленный метод.

– В свою очередь, для H.263P:

– bitrate – значение по умолчанию: 300 Кбит/с;

– gop-size – количество кадров в пределах группы изображений, значение по умолчанию: 15;

– pass – пасс/тип кодировки, значение по умолчанию: cbr(0).

– Настройки H.264:

– bitrate – значение по умолчанию: 2048 Кбит/с;

– key-int-max – максимальное расстояние между двумя кадрами, значение по умолчанию: 0;

– speed-preset – предустановка скорости/качества, значение по умолчанию: medium (6);

– tune – предустановка параметров непсиховизуальной настройки, значение по умолчанию: (none);

– threads – количество потоков, используемых кодеком, значение по умолчанию: 0;

– pass – пасс/тип кодировки, значение по умолчанию: cbr(0).

– Настройки MPEG-4:

– bitrate – значение по умолчанию: 300 Кбит/с;

– gop-size – количество кадров в пределах группы изображений, значение по умолчанию: 15.

Заключение

В статье подробно изложен процесс разработки ПО, которое позволяет транслировать потоковое видео и является достаточно качественным для управления наземным роботом при использовании каналов связи низкой пропускной способности.

1. Edge detection [Электронный ресурс]: Sobel operator. – 2018. – URL: https://en.wikipedia.org/wiki/ Sobel_operator
2. Edge detection [Электронный ресурс]: Discrete Laplace operator. – 2018. – URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Discrete_Laplace_ operator
3. Canny J. A Computational Approach to Edge Detection // IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence. – 1986. – Т. PAMI. – 8, № 6. – С. 679–698.
4. Edge detection [Электронный ресурс]: Canny edge detector. – 2018. – URL: https://en.wikipedia.org/ wiki/Canny_edge_detector
5. Dithering [Электронный ресурс]: Dither. – 2018. – URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Dither.
6. Dithering [Электронный ресурс]: Helland T. Image Dithering: Eleven Algorithms and Source Code. – 2018. – URL: http://www.tannerhelland. com/4660/dithering–eleven–algorithms–source–code/
7. Zlib [Электронный ресурс]: zlib. – 2018. – URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Zlib
8. Zlib [Электронный ресурс]: zlib. – 2018. – URL: http://zlib.net

V.V. Varlashin[1], M.A. Ershova[1], V.A. Bunyakov[2], O.A. Shmakov[1,2]

CIRCULAR REVIEW SYSTEM WITH AUGMENTED REALITY FOR MOBILE ROBOTS CONTROL

[1]SPbPU, [2] Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics, Saint-Petersburg
v.varlashin@rtc.ru, m.ershova@rtc.ru, bunyakov@rtc.ru, shmakov@rtc.ru

Abstract

In this paper circular review system with augmented reality for mobile robots control based on the multiple cameras with wide-angle and fisheye lenses is reviewed.

Circular-review system consists of four cameras and a dedicated processor for capturing and broadcasting video to a personal computer via a digital television radio channel with the subsequent capture and processing images on a computer.

Two algorithms to obtain third-person point of view are implemented. The first one is based on perspective transformation of all images and stitching them into one. The second is based on transformation of circular panorama.

The methods of projective geometry are investigated in MATLAB to obtain third-person point of view with different 3D-models of surfaces.

Key words: computer vision, surround-view system for mobile robot, image projection, augmented reality, perspective transformation.

В.В. Варлашин[1], М.А. Ершова[1], В.А. Буняков[2], О.А. Шмаков[1,2]

СИСТЕМА КРУГОВОГО ОБЗОРА С ТЕХНОЛОГИЕЙ ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНЫМИ РОБОТАМИ

[1]СПбПУ, [2]ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург
v.varlashin@rtc.ru, m.ershova@rtc.ru, bunyakov@rtc.ru, shmakov@rtc.ru

Аннотация

В статье рассматривается система кругового обзора реального времени с технологией дополненной реальности для управления мобильными роботами на базе системы телекамер с использованием широкоугольных и сверхширокоугольных объективов типа «рыбий глаз» (англ. fisheye).

Система кругового обзора состоит из четырех телекамер и специализированного процессора для захвата и передачи потокового видео на персональный компьютер посредством цифрового телевизионного радиоканала с последующим захватом и обработкой изображений на компьютере.

Реализованы алгоритмы получения перспективного вида сверху с использованием двух подходов: перспективных преобразований четырех изображений и их последующей склейкой и получение вида сверху с использованием круговой панорамы.

Исследованы методы проективной геометрии для получения перспективного вида «от третьего лица» в пакете MATLAB с использованием различных вариантов поверхностей.

Ключевые слова: компьютерное зрение, система кругового обзора мобильного робота, проекция изображения, дополненная реальность, перспективное преобразование.

Введение

Область применения мобильных роботов (МР) постоянно расширяется. Повышение эффективности информационного взаимодействия оператора с мобильным робототехническим комплексом зависит от сенсорных систем, расположенных на борту комплекса, и методов управления.

Эффективным способом получения информации об окружающей среде является использование систем кругового обзора, визуально обеспечивающих эффект присутствия. Увеличение вычислительных мощностей с одновременной миниатюризацией и снижением энергопотребления вычислительной техники позволяют расширить область применения систем технического зрения

(СТЗ) в управлении МР [1], в частности, с использованием элементов дополненной реальности в составе программного обеспечения носимых пультов дистанционного управления.

Дополненная реальность (ДР, англ. augmented reality) – это технологии, позволяющие дополнять изображение реальных объектов различными объектами компьютерной графики, а также совмещать изображения, полученные от разных источников: телекамер, тепловизоров, спектрометров и т.д. В отличие от виртуальной реальности, которая предполагает полностью искусственный синтезированный мир (видеоряд), ДР предполагает внедрение синтезированных объектов в естественные видеосцены [2].

СТЗ с технологией ДР широко применяются в составе систем кругового обзора транспортных средств и используются для помощи водителям при движении, парковке, устранения «слепых» зон [3-8]. Применение СТЗ с технологией ДР для управления МР имеет несколько направлений:

– дополнение видеосцены виртуальными объектами [9];

– использование виртуальных интерактивных элементов управления роботом [10];

– совмещение виртуальной модели робота с видеосценой [11, 12].

Последний вариант является прямым аналогом систем кругового обзора для транспортных средств. Реализация подобной системы в составе МР позволит оператору получать информацию о локальном месторасположении робота в рабочем пространстве.

Модуль кругового обзора

Аппаратная платформа разрабатываемой системы реализована на базе четырехканального видеомодуля с телекамерами с fisheye-объективами и специализированном видеопроцессоре для захвата и трансляции потокового видео на одноплатный персональный компьютер посредством телевизионного цифрового радиоканала. Структура системы представлена на рис. 1.

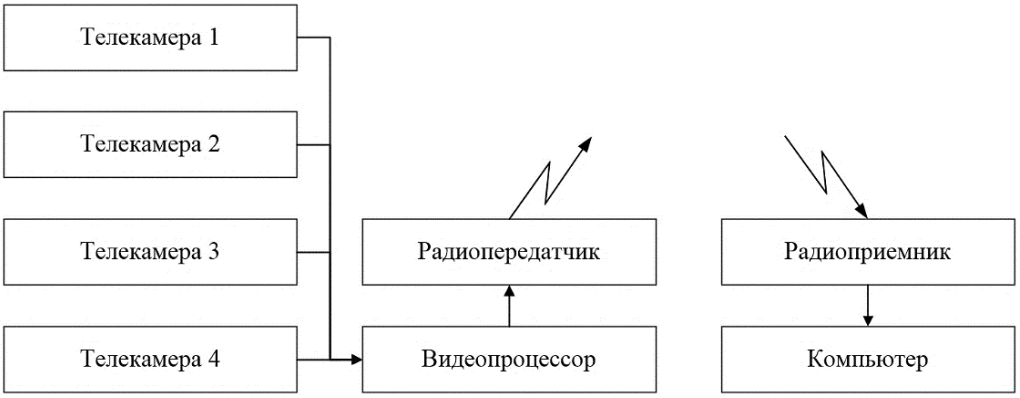


Рисунок 1 – Структура системы кругового обзора

На рис. 2 представлены 3D-CAD модель разрабатываемого модуля (слева) и внешний вид макета устройства с установленными ТВ-камерами (справа). Малые габариты модуля (120 х 120 х 80 мм) позволяют уменьшить параллакс входных изображений, а также обеспечивают возможность размещения модуля на борту МР легкого и сверхлегкого классов (см. рис. 3).

Рисунок 2 – 3D-CAD модель разрабатываемого модуля (слева)
и внешний вид макета устройства (справа)

Телекамеры и видеопроцессор представляют собой модуль для размещения на МР. Возможно использование модульных телевизионных камер сверхвысокой чувствительности с креплением М12 с аналоговым выходным сигналом либо веб-камер стандарта USB 2.0/3.0 с установленными fisheye-объективами.

Одним из значимых вопросов при проектировании системы является выбор цветных или черно-белых телекамер. В силу высокой чувствительности и низкой стоимости в рамках работы выбраны телекамеры BHV600D (ф. БИК-Информ), формирующие черно-белое изображение.

Базовым компонентом видеопроцессора является микросхема специализированного контроллера видеосигналов TW2837 (ф. Intersil). Основной задачей устройства является одновременный доступ к изображениям с четырех телевизионных камер при условии существующего единственного телевизионного радиоканала. Видеопроцессор имеет три режима работы: трансляция изображения с одной телекамеры, объединение входных изображений с четырех телекамер в одно (квадратор) и режим PIP (англ. Picture in Picture – картинка в картинке). На рис. 4 представлен пример изображения, передаваемого на персональный компьютер. Алгоритм работы системы кругового обзора представлен в виде блок-схемы на рис. 5.

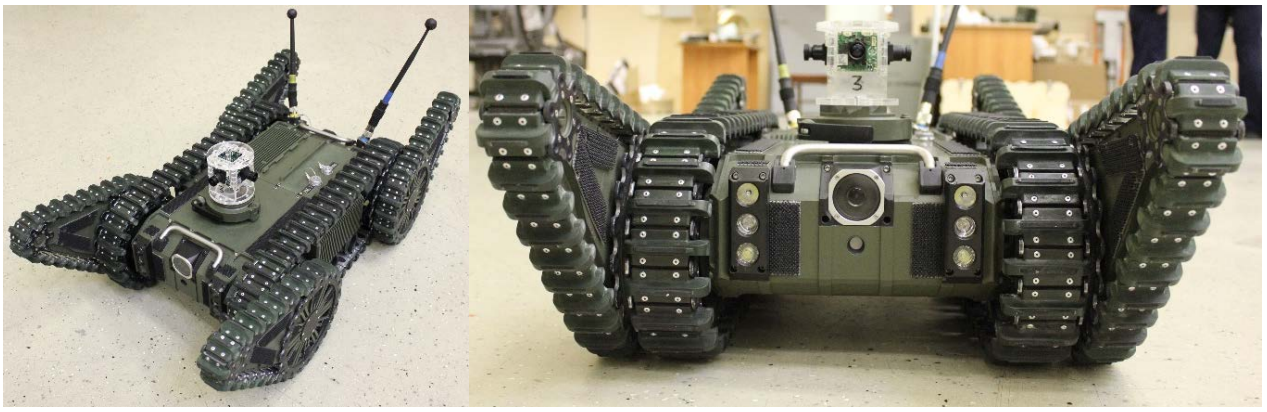


Рисунок 3 – Макет модуля в составе малогабаритного робототехнического комплекса «Капитан»

Рисунок 4 – Пример изображения, передаваемого на персональный компьютер

Рисунок 5 – Блок-схема работы алгоритма получения вида «от третьего лица

Получение панорамного изображения

Для формирования панорамного изображения необходимо получить информацию о внутренних и внешних параметрах системы при помощи калибровки отдельных камер и системы в целом. На основе полученных параметров производится преобразование входных изображений.

Входные изображения, полученные с телекамер, подвергаются деформации для проецирования на цилиндрическую поверхность. Схема деформации представлена на рис. 6.

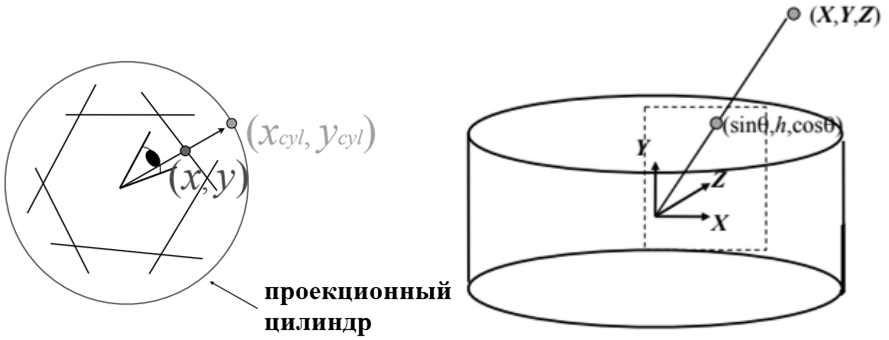


Рисунок 6 – Схема цилиндрической деформации

Деформация изображений описывается формулами (1-3).

$$\theta = (x_{cyl} - x_c)/f,$$
$$h = (y_{cyl} - y_c)/f, \quad (1)$$

$$\hat{x} = \sin\theta,$$
$$\hat{y} = h, \quad (2)$$
$$\hat{z} = \cos\theta,$$

$$x = f(\hat{x}/\hat{z}) + x_c,$$
$$y = f(\hat{y}/\hat{z}) + y_c, \quad (3)$$

где x_c и y_c – координаты центра входного изображения в пикселях,

x_{cyl} и y_{cyl} – координаты пикселя входного изображения,

x и y – координаты выходного изображения,

f – фокусное расстояние.

Полученные после деформации изображения объединяются в круговую панораму по схеме, представленной на рис. 7. Смежные области изображений, полученных в результате цилиндрической деформации, проходят процедуру смешивания граничных областей (англ. blending). На рис. 8 представлен результат склеивания изображений в панораму. Вертикальные смещения обусловлены взаимным расположением телекамер после установки в корпус макета.

Рисунок 7 – Схема склеивания изображений (сверху)

Рисунок 8– Результат склеивания изображений в панораму (снизу)

Перспективные преобразования

Существуют аффинные и перспективные преобразования. Перспективные преобразования используются в системах кругового обзора транспортных средств для получения ортографического вида сверху с последующей склейкой кадров [13-14]. Пример последовательности действий для получения вида сверху представлен на рис. 9.

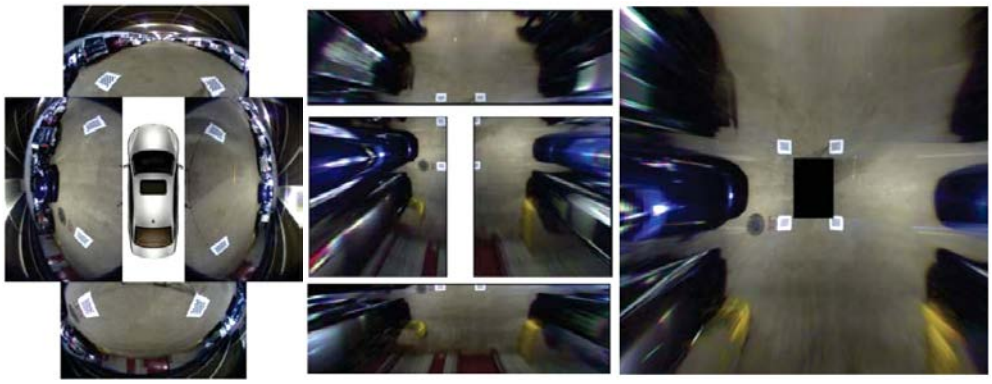


Рисунок 9 – Последовательность действий при получении вида сверху

Получение матрицы перспективного преобразования осуществляется с использованием четырех точек, которые соответствуют прямоугольной области горизонтальной плоскости. На рис. 10

представлен вариант ручного указания точек, возможно использование автоматического определения калибровочного шаблона типа «шахматная доска», имеющего известные геометрические размеры.

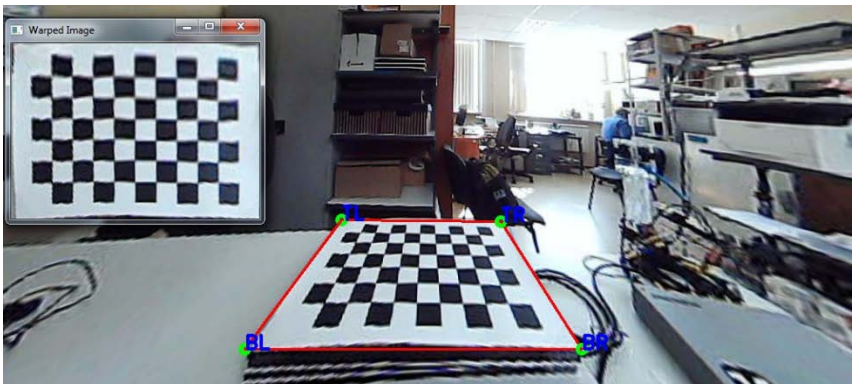


Рисунок 10 – Получение ортографического вида на примере шаблона «шахматная доска»

На данном этапе работы осуществляется реализация получения вида сверху с использованием перспективных преобразований с последующей склейкой изображений.

Получение вида сверху с использованием круговой панорамы

Альтернативным вариантом для построения вида сверху является использование круговой панорамы, рассмотренной ранее. В работе [15] описывается преобразование, позволяющее получить панорамное изображение при помощи телекамеры с fisheye-объективом. Применяя подобное преобразование, можно перейти от панорамы к виду сверху.

Будем использовать переход от декартовых координат к цилиндрическим (4):

$$x = \rho \cos \varphi, \qquad y = \rho \sin \varphi, \tag{4}$$

где ρ и φ – пиксельные координаты исходного изображения (нижней половины панорамы),

x и y – пиксельные координаты выходного изображения.

Для построения вида сверху в режиме реального времени можно использовать табличные преобразования, которые рассчитываются один раз и могут быть применены в дальнейших вычислениях.

На рис. 11 представлен результат работы алгоритма, на рис. 12 – совмещение вида сверху и виртуальной модели робота.

Рисунок 11 – Вид сверху, полученный с использованием круговой панорамы

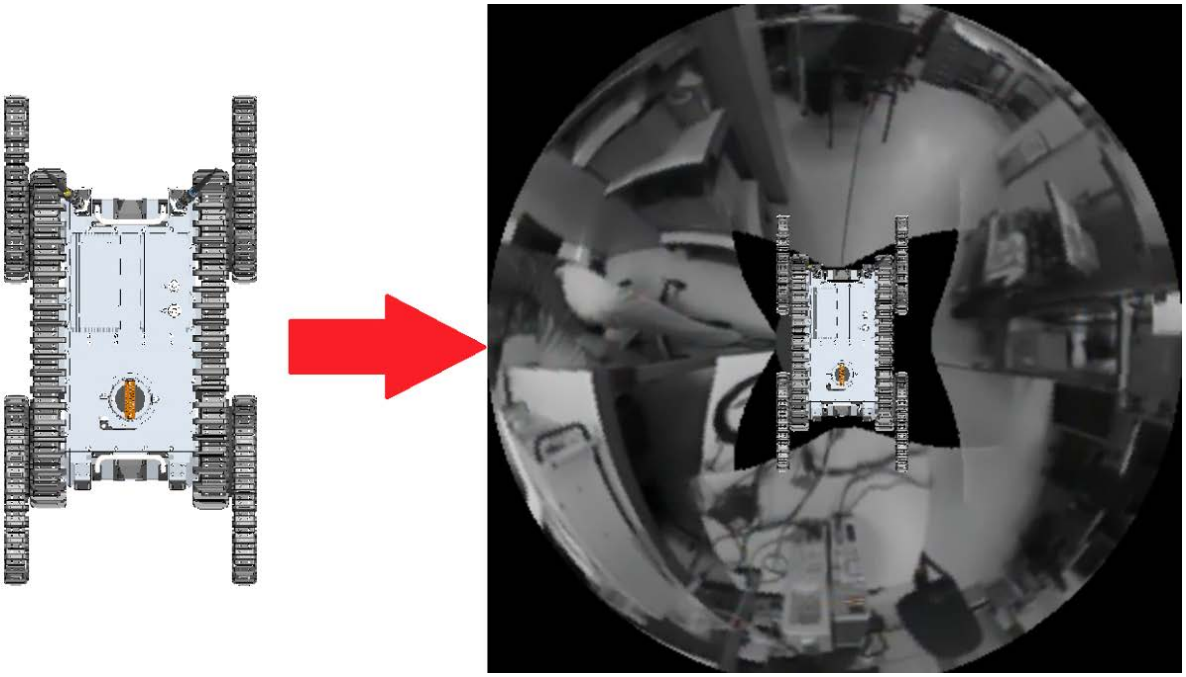


Рисунок 12 – Совмещение вида сверху и виртуальной модели робота.

Результаты

Входное изображение, состоящее из четырех кадров телекамер, имеет разрешение 720 x 576 пикселей. Обработка изображений проводится на ноутбуке Lenovo Yoga 2 Pro с процессором Core i5-4200U. Вычисления осуществляются без использования графического процессора. Программное обеспечение реализовано в среде разработки Microsoft Visual Studio 2017 совместно с открытым программным обеспечением в виде библиотеки OpenCV 3.3.

Среднее время обработки одного кадра составляет 50 мс (частота 20 Гц). В табл. 1 представлены операции, выполняемые при обработке изображений, и их средняя продолжительность.

Таблица 1. Время выполнения операций при обработке изображений

Операция	**Время выполнения, мс**
Выбор ROI каждой камеры на исходном изображении	1
Устранение дисторсий	2
Проецирование на цилиндрическую поверхность	3
Склеивание изображений в панораму с использованием алгоритма MultiBand Blender	36
Получение вида сверху	3
Совмещение вида сверху и виртуальной модели робота	5
Итого	50

Из табл. 1 видно, что наиболее времязатратной операцией является в склеивание изображений в панораму. Причиной этому является вычисление пирамид Лапласа. Остальные операции осуществляются с помощью табличных преобразований, что положительно сказывается на быстродействии.

Получение вида от третьего лица

Последним этапом алгоритма на рис. 5 является получение вида «от третьего лица». Для этого необходимо осуществить проецирование склеенных кадров на определенную поверхность. Распространенным вариантом являются параболические поверхности [3].

Для выбора формы поверхности использован пакет Matlab, в котором есть встроенная функция «warp», принимающая в качестве параметров векторы с координатами точек поверхности и изображение для проецирования, что позволяет быстро изменять форму поверхности и сравнивать полученные результаты.

На рис. 13 представлен вариант проецирования на тороидальную поверхность, описываемую системой уравнений (5).

$$\begin{aligned} x(\varphi,\psi) &= (R + r\cos\varphi)\cos\psi, \\ y(\varphi,\psi) &= (R + r\cos\varphi)\sin\psi, \\ z(\varphi,\psi) &= r\sin\varphi, \end{aligned} \tag{5}$$

где $\varphi \in [0,\pi]$,

$\psi \in [-\pi/3\,,\pi/3]$.

Рисунок 13 – Проецирование панорамы на тороидальную поверхность

Дальнейшим направлением работ является реализация подобного преобразования в Microsoft Visual Studio 2017 с использованием библиотеки OpenCV 3.3.

Выводы

Разработан программно-аппаратный комплекс системы кругового обзора, состоящий из модуля кругового обзора, устанавливаемого на МР, и программного обеспечения, реализующего технологию дополненной реальности.

Реализован алгоритм получения вида сверху с использованием круговой панорамы и совмещение полученного изображения с виртуальной моделью робота. Исследованы методы построения вида «от третьего лица», предложено использование тороидальной поверхности вместо параболических поверхностей.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках государственного задания СПбПУ Петра Великого (кафедра «Мехатроника и роботостроение»), проект № 9.4040.2017/4.6.

1. Рюмин А.В. Использование сверхширокоугольных камер в составе досмотровых роботов // Прикладные проблемы безопасности технических и биотехнических систем, № 1, СПБ, 2017, С. 33-40.
2. Ronald T. Azuma A Survey of Augmented Reality // In Presence: Teleoperators and Virtual Environments. – № 4.1997. pp. 355–385.
3. Yeh Y.-T., Peng C.-K., Chen K.-W., Chen Y.-S., Hung Y.-P. Driver Assistance System Providing an Intuitive Perspective View of Vehicle Surrounding // C. V. Jawahar & Shiguang Shan, ACCV Workshops (2), Springer. 2014. pp. 403-417.

4. Официальный сайт компании Nissan. URL: www.nissan-global.com/EN/TECHNOLOGY/ OVERVIEW/ avm.html (дата обращения: 31.10.2017).
5. Официальный сайт компании Fujitsu. URL: www.fujitsu.com/us/products/devices/semiconductor/ gdc/products/omni.html (дата обращения: 31.10.2017).
6. Xylon Solutions for the Surround View DA. Официальный сайт компании logicBriks. URL: https://www.logicbricks.com/solutions/surround-view-da-system.aspx (дата обращения: 31.10.2017)
7. Advanced Driver Assistance Systems (ADAS), Официальный сайт компании TI. URL: http://www.ti.com/applications/automotive/adas/overview.html (дата обращения: 31.10.2017)
8. Прищепа М.В., Будков В.Ю., Ронжин А.Л. Система интеллектуального управления мобильным информационно-справочным роботом // Информационно-управляющие системы. – 2010. – № 6. – С. 2-6.
9. T. Dias, P. Miraldo, N. Gonçalves and P. U. Lima. Augmented reality on robot navigation using non-central catadioptric cameras, 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Hamburg, 2015, pp. 4999-5004.
10. Hashimoto, Sunao & Ishida, Akihiko & Inami, Masahiko & Igarashi, Takeo. (2018). TouchMe: An Augmented Reality Based Remote Robot Manipulation
11. Fumio Okura, Yuko Ueda, Tomokazu Sato, Naokazu Yokoya. Free-viewpoint Mobile Robot Teleoperation Interface Using View-dependent Geometry and Texture, ITE Transactions on Media Technology and Applications, 2014.
12. I. Baftiu, A. Pajaziti and K. C. Cheok, Multi-mode surround view for ADAS vehicles. IEEE International Symposium on Robotics and Intelligent Sensors (IRIS), Tokyo, 2016, pp. 190-193.
13. Kashyap V., Agrawal P., Akhbari F. Real-time, Quasi Immersive, High Definition Automotive 3D Surround View System // Int'l Conf. IP, Comp. Vision, and Pattern Recognition. 2017. pp. 10-16.
14. Ватаманюк И.В., Ронжин А.Л. Применение методов оценивания размытости цифровых изображений в задаче аудиовизуального мониторинга // Обработка информации и управление. – 2014. – № 4. – С. 16-23.
15. Лазаренко В.П., Джамийков Т.С., Коротаев В.В., Ярышев С.Н. Метод создания сферических панорам из изображений, полученных всенаправленными оптико-электронными системами // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики, Т. 16. № 1. СПБ: ИТМО, 2016. С.46–53.

S.R. Orlova, A.V. Bakhshiev

ROAD SIGN RECOGNITION USING DEEP NEURAL NETWORKS

Russian State Scientific Center for Robotics and
Technical Cybernetics, Saint-Petersburg
s.orlova@rtc.ru, alexab@rtc.ru

Abstract

Recently, there has been an increased interest in the development of technologies for autonomous driving and vehicular automation. In the field of vision systems, this led to the actualization of a variety of tasks related to the recognition of road environment - marking, signs, vehicles, pedestrians, etc. For many such problems, solutions based on classical methods of technical vision (binarization, Haar wavelets and Haar-like features, HOG, SVM etc.) have existed for many years, however, the use of neural networks has made it possible to achieve the accuracy and speed required in most cases.

The report considers the application of deep convolutional neural networks to solve the problem of recognizing Russian road signs, i.e. their detection and classification. Also, the influence of various conditions and learning parameters on the final result is studied.

Key words: neural network, convolutional neural network, deep learning, object detection, computer vision, road signs.

С.Р. Орлова, А.В. Бахшиев

РАСПОЗНАВАНИЕ ДОРОЖНЫХ ЗНАКОВ НА БАЗЕ ГЛУБОКИХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург
s.orlova@rtc.ru, alexab@rtc.ru

Аннотация

В последнее время в мире наблюдается повышенный интерес к развитию технологий автономного вождения и автоматизации транспорта. В области систем технического зрения это привело к актуализации множества задач, связанных с распознаванием дорожной обстановки – разметки, знаков, транспортных средств, пешеходов и т.д. Для множества таких задач уже много лет существуют решения, основанные на классических методах технического зрения (бинаризация, вейвлеты и признаки Хаара, гистограммы направленных градиентов, метод опорных векторов и т.д.), однако применение нейронных сетей позволило достичь требуемых в большинстве случаев точности и скорости работы.

В докладе рассматривается применение глубоких сверточных нейронных сетей для решения задачи распознавания российских дорожных знаков, а именно их обнаружения и классификации. Также изучается влияние различных условий и параметров обучения на конечный результат.

Ключевые слова: нейронная сеть, сверточная нейронная сеть, глубинное обучение, обнаружение объектов, система технического зрения, дорожные знаки.

Введение

В последние несколько лет активно развиваются область беспилотных автомобилей, технологии автономного вождения. Крупные производители автомобилей и корпорации, связанные с информационными технологиями (Volkswagen, General Motors, Nissan, Volvo, Google, Uber, Яндекс и др.), выполняют исследования и разработку систем вождения различного уровня автономности. Существует множество небольших компаний и исследовательских групп, ведущих разработки в том же направлении.

Всего существует 6 уровней автоматизации автомобилей в стандартной классификации, разработанной сообществом автомобильных инженеров (SAE) [1]:

– Уровень 0. Отсутствие контроля над машиной, но может присутствовать система уведомлений.

– Уровень 1. Водитель должен быть готов в любой момент взять управление на себя. Могут присутствовать следующие автоматизированные системы: круиз-контроль, автоматическая парковочная система и система предупреждения о сходе с полосы.

– Уровень 2. Водитель должен регаировать, если система не смогла справиться самостоятельно. Система управляет ускорением, торможением и рулением. Система может быть отключена.

– Уровень 3. Водитель может не контролировать машину на дорогах с "предсказуемым" движением (например, автобаны), но должен быть готовым взять управление.

– Уровень 4. Аналогично 3-му уровню, но система уже не требует внимания водителя.

– Уровень 5. Со стороны человека не требуется никаких действий, кроме старта системы и указания пункта назначения. Автоматизированная система может доехать до любой точки назначения, если это не запрещено законом.

На всех уровнях автоматизации от системы требуется распознавать дорожную обстановку, т.е. распознавать средства организации дорожного движения (разметку, знаки, светофоры, ограждения и направляющие устройства и т.п.), другие транспортные средства, людей (пешеходов, велосипедистов), а также различные подвижные и неподвижные препятствия. При этом для получения данных может использоваться не только монокулярная камера, но и камера инфракрасного диапазона, стереокамеры, лидары и радары. Из этого следует, что любая система автономного вождения обязательно должна иметь в своём составе систему технического зрения, и задачи, которые она должна решать, можно разделить на две группы:

– Распознавание средств организации дорожного движения. Все объекты, относящиеся к средствам организации дорожного движения, как правило, неподвижны, а их вид строго регламентирован.

– Распознавание транспортных средств, людей, подвижных и неподвижных препятствий. Объекты этой группы отличаются разнообразным внешним видом, невозможно заранее предсказать все возможные их конфигурации.

В данной работе рассматриваются методы технического зрения для решения первой задачи, а именно методы, применяемые для обнаружения дорожных знаков.

Предшествующие работы

Среди методов технического зрения, применяемых для обнаружения дорожных знаков, наибольшей популярностью пользуются методы, основанные на признаках и нейросетевые методы.

Методы, основанные на признаках, рассматривают объект как комбинацию различных признаков, таких, как части объекта, углы и края, пятна и т.д. Сравнивая области интереса (полученные, например, методом скользящего окна) на изображении с наборами признаков, соответствующими искомым объектам, можно определить, находится в области интереса объект или же нет (рисунок 1). Как правило, в настоящее время в таких методах применяются признаки Хаара, поскольку они позволяют достичь наибольшей скорости работы метода.

Рисунок 1 – Пример признаков Хаара, соответствующих частям (признакам) человеческого лица

Также распространены методы, использующие HOG - Histogram of Oriented Gradients, гистограмму направленных градиентов. Основной идеей алгоритма является допущение, что внешний вид и форма объекта на участке изображения могут быть описаны распределением градиентов интенсивности или направлением краев. Изображение равномерно разделяется на маленькие связные области, именуемые ячейками. Для каждой ячейки рассчитываются гистограммы направлений градиентов или направлений краев для пикселей, находящихся внутри ячейки (рисунок 2, справа). Комбинация таких гистограмм называется дескриптором. Конечным шагом в распознавании объектов с использованием HOG является классификация дескрипторов при помощи системы обучения с

учителем – обычно это метод SVM - Support Vector Machine, метод опорных векторов, называемый также методом классификатора с максимальным зазором и относящийся к семейству линейных классификаторов.

Также часто применяется фильтрация по цвету и яркости в алгоритмах выделения областей интереса на изображении и в алгоритмах непосредственно локализации и классификации [2].

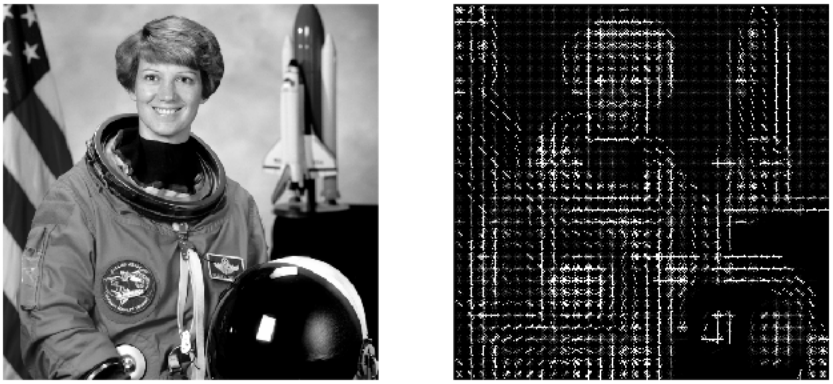


Рисунок 2 – Слева – исходное изображение, справа – его гистограмма направленных градиентов

Методы, основанные на признаках, позволяют выполнять обнаружение движущихся и неподвижных объектов с достаточно хорошими скоростью и точностью работы. В последние годы различные исследовательские группы продолжают предлагать усовершенствованные алгоритмы обнаружения, использующие признаки Хаара и гистограммы направленных градиентов [3].

Несколько лет назад, благодаря появлению на рынке относительно недорогих и высокопроизводительных вычислителей (графических процессоров, GPU) и успешным разработкам эффективных нейросетевых архитектур и подходов к обучению, применение нейронных сетей для распознавания изображений (классификации, обнаружения, сегментации) не только стало возможным и во многих случаях - целесообразным и эффективным, но и открыло новые перспективы в области компьютерного зрения и обработки информации. Для распознавания изображений применяются сверточные нейронные сети, входной слой которых принимает не вектор значений, а матрицу (которой и является изображение в цифровом формате, с одним каналом в случае черно-белого изображения и с тремя - в случае цветного). Такие сети выполняют над изображением ряд свёрток с фильтрами (которые также являются матрицами, обычно 1x1, 3x3, 5x5 и 7x7, с произвольным количеством каналов), веса которых настраиваются в процессе обучения. После свёрточных слоёв могут идти несколько полносвязных слоёв для представления результата в виде вероятностей принадлежности к классам; в случае архитектур для обнаружения все слои зачастую являются свёрточными, ведь результат работы таких сетей - выделение областей, в которых находятся объекты. Все современные архитектуры являются глубокими, т.е. содержат большое количество слоёв: для классификации более 10, для обнаружения - десятки.

В 2015 году была предложена принципиально новая архитектура нейронной сети Faster R-CNN [4], особенностью которой было однократное использование свёрточной нейронной сети, выделяющей признаки классов объектов, на всё изображение целиком, т.е. отказ от скользящего окна. Это позволяло значительно ускорить работу сети.

Затем появились архитектуры YOLO (You only look once) [5] и SSD (Single shot multibox detector) [6], которые использовали тот же подход, т.е. однократное использование свёрточной нейронной сети для получения карты признаков, но имели свои особенности. YOLO имела последовательную структуру, полносвязные слои и меньшее количество слоёв, чем SSD. SSD же была полностью свёрточной и объединяла в одном из конечных слоёв результаты (карты признаков), полученные с нескольких последовательно расположенных сверточных слоев. Скорость и точность работы этих двух нейронных сетей значительно превышала полученные в [4] результаты (при использовании Faster R-CNN).

Наконец, самой новой наиболее известной архитектурой в настоящее время является YOLOv2 [7]. Это улучшенная версия YOLO, которая позаимствовала некоторые удачные особенности из

архитектуры SSD: сеть полностью состоит из свёрточных слоёв и имеет также слои выделения признаков различного размера, чтобы улучшить обнаружение объектов в различном масштабе.

Сравнительные данные о точности и скорости работы YOLOv2 представлены на рисунке 3.

Есть ряд работ, посвященных распознаванию дорожных знаков с использованием нейронных сетей [8, 9].

Метод YOLOv2

Модель нейронной сети архитектуры YOLOv2 может содержать различное количество сверточных блоков (состоящих из комбинаций слоёв свертки и подвыборки) в начале сети (Рисунок 4), однако все они в итоге порождают несколько карт признаков различного масштаба. Все такие полученные карты затем проходят через классификатор (с функций активации softmax) и подавление немаксимумов, чтобы отсечь повторяющиеся предсказания.

Большое количество нейросетевых алгоритмов для обнаружения объектов используют подобный подход, однако характерное отличие YOLOv2 заключается в способе выбора областей интереса. Обычно для этого применяется скользящее окно одного или разных масштабов, разбиение сеткой на фрагменты или набор заранее определенных рамок различных размеров. Архитектура YOLOv2 построена таким образом, что изображение условно разбивается на ячейки 32x32 пикселя, и сеть получает предсказания для таких ячеек. Для каждой ячейки предсказывается B наборов из N рамок разных размеров. Авторы модели экспериментально подобрали наиболее оптимальные значения: B=2, N=5. Интересен также и способ подбора размеров рамок - они зависят от данных. Набор данных, использующихся для обучения или тестирования сети, разбивают на N кластеров с помощью алгоритма k-средних. Таким образом, если имеется множество мелких объектов, то в наборе будут рамки с малыми размерами, если имеется множество вытянутых объектов - то набор будет содержать соответствующие рамки. Это позволяет сделать работу нейронной сети быстрой и точной.

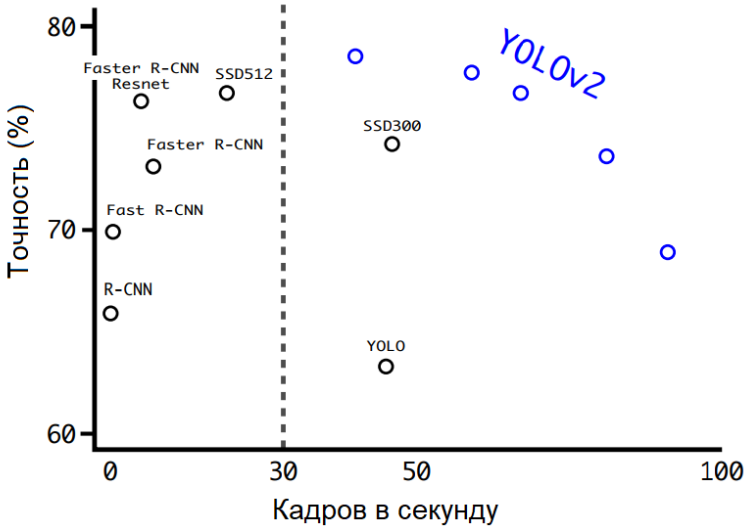


Рисунок 3 – Характеристики точности и скорости работы различных нейросетевых алгоритмов

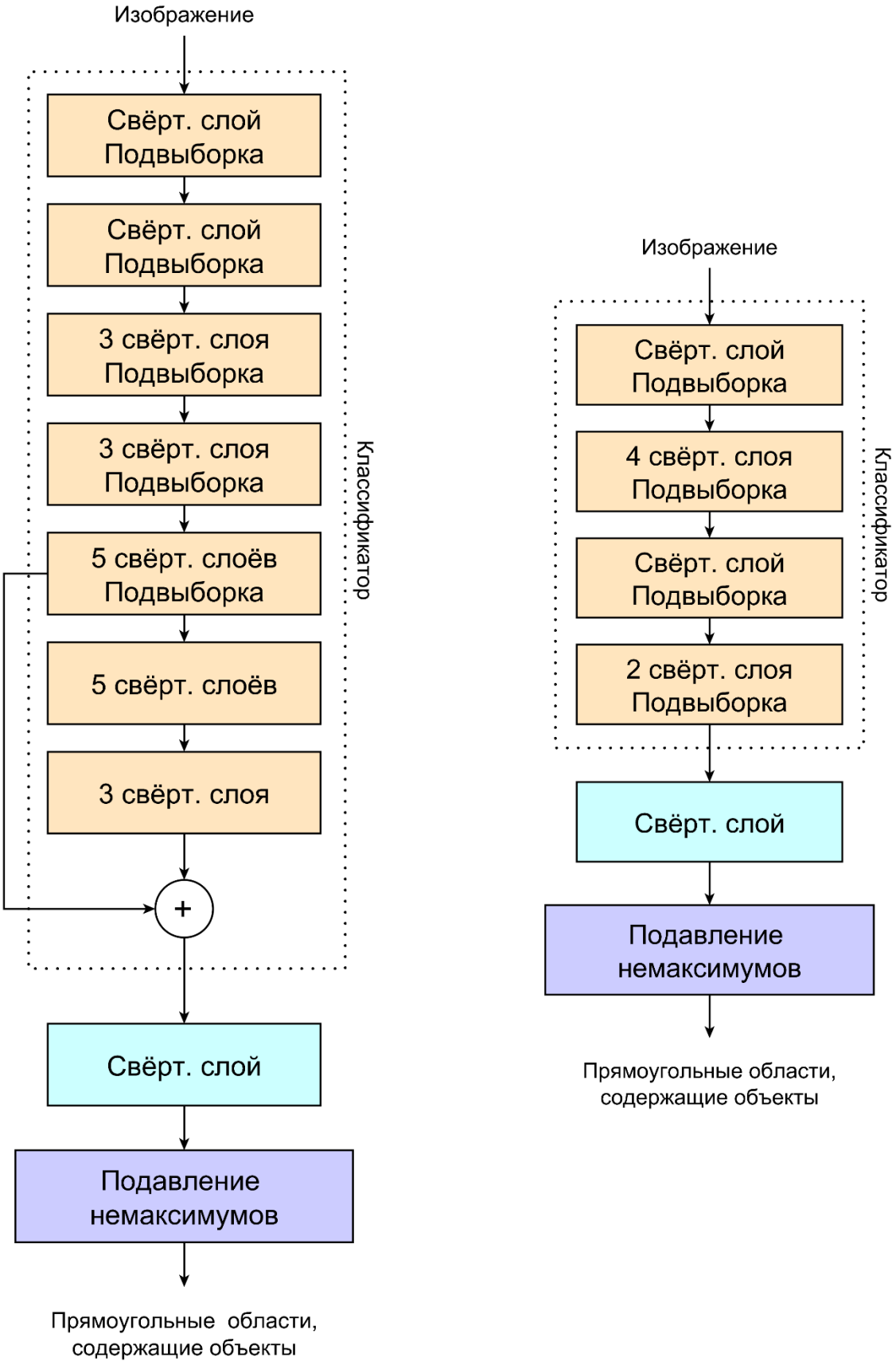


Рисунок 4 – Схема модели YOLOv2 Full (слева) и YOLOv2 Tiny (справа)

Экспериментальные исследования

Реализация модели YOLOv2 была выполнена с использованием фреймворков TensorFlow [10] и Keras [11]. Для экспериментов использовалась модель YOLOv2 Tiny. Для обучения использовалась российская база автодорожных знаков [8], для предобработки данных для обучения и тестирования — встроенные методы библиотеки OpenCV [12]. Были также реализованы программные модули аугментации базы данных, создания выборок по классам и модуль оценки, выполняющий расчет некоторых метрик для оценки качества работы модели.

Использовались следующие метрики:

1. IoU (intersection over union).

Мера соответствия двух рамок (рисунок 5), может принимать значения от 0 (полное несовпадение) до 1 или 100% (полное совпадение). Это отношение площади пересечения двух рамок к площади их объединения.

2. Полнота и точность.

Обнаружения модели можно разделить на три группы:

- TP (true positives), истинно-положительные - когда предсказанная рамка объекта имеет IoU с истинной не ниже порогового значения IoU, а его класс предсказан с уверенностью не ниже порогового значения уверенности;
- FP (false positives), ложноположительные - все предсказанные объекты, не являющиеся истинно-положительными;
- FN (false negatives), ложноотрицательные - все объекты, присутствующие в истинной разметке данных, но не предсказанные моделью.

Тогда точность – это доля истинно-положительных обнаружений от всех предсказанных, а полнота – доля истинно-положительных обнаружений от всех объектов, содержащихся на изображениях.

$$\text{Точность} = \text{TP} / (\text{TP} + \text{FP}) \quad (1)$$

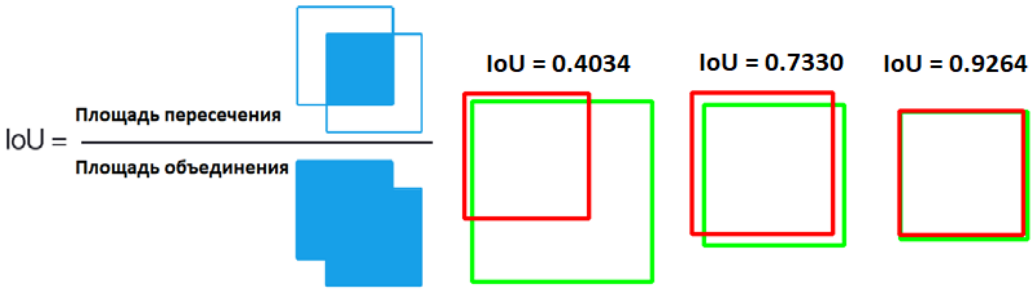
$$\text{Полнота} = \text{TP} / (\text{TP} + \text{FN}) \quad (2)$$

3. Средняя точность по классу (average precision).

Устанавливается класс объекта и ряд пороговых значений уверенности. Для выбранного класса и каждого такого значения уверенности получают полноту и точность. Получается ряд точек, по которым можно построить график зависимости точности от полноты. Так как значения точности и полноты находятся в диапазоне от 0 до 1, средней точностью по классу будет площадь под полученной кривой. На практике среднюю точность по классу считают приближенно – например, рассчитывают среднее арифметическое по ряду значений точности.

4. Средняя точность по всем классам (mean average precision).

Это среднее арифметическое по средним точностям по классам. Если в выборке всего один класс, то очевидно, что средняя точность по всем классам совпадает со средней точностью по классу.



а) Иллюстрация расчета IoU б) Примеры значений IoU

Рисунок 5 – Схема модели YOLOv2 Full (слева) и YOLOv2 Tiny (справа)

Были проведены следующие эксперименты с различным числом классов в выборке:

1. 1 класс: «пешеходный переход» (5.19.1).
2. 2 класса: «пешеходный переход», «главная дорога» (5.19.1, 2.1).
3. 3 класса: «пешеходный переход», «главная дорога», «знак» (5.19.1, 2.1, sign). Классом знак в выборке обозначались все остальные классы.
4. 1 класс: «знак» (sign).

Результаты представлены на графиках и в таблице ниже.

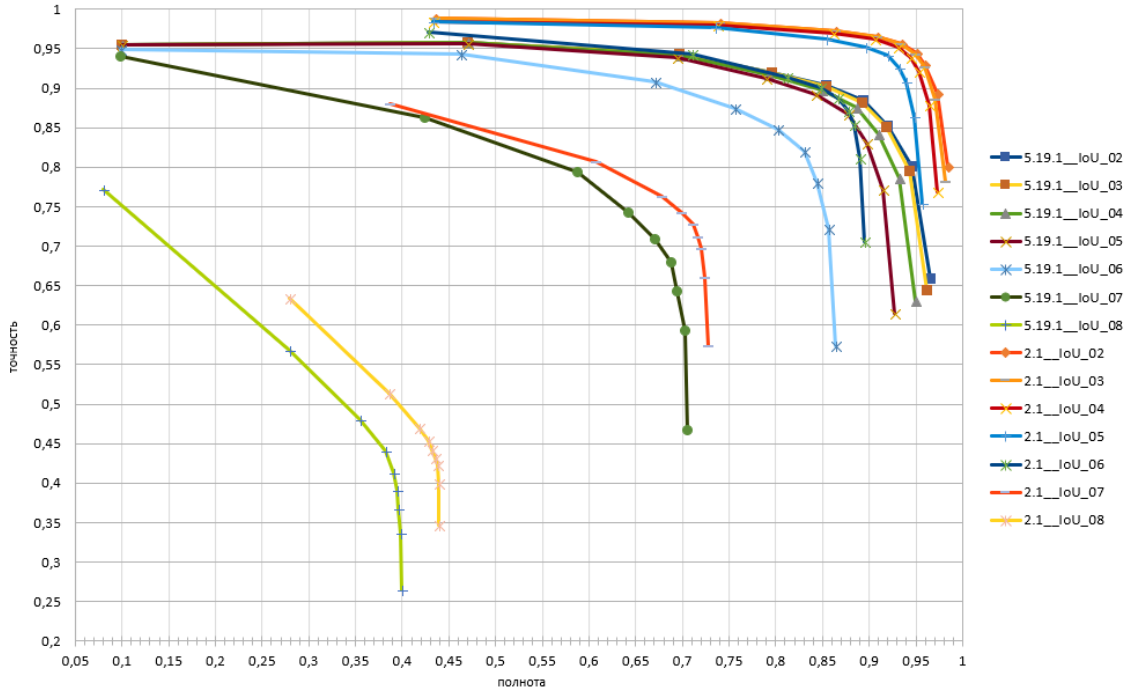


Рисунок 6 – График точности и полноты для эксперимента 2

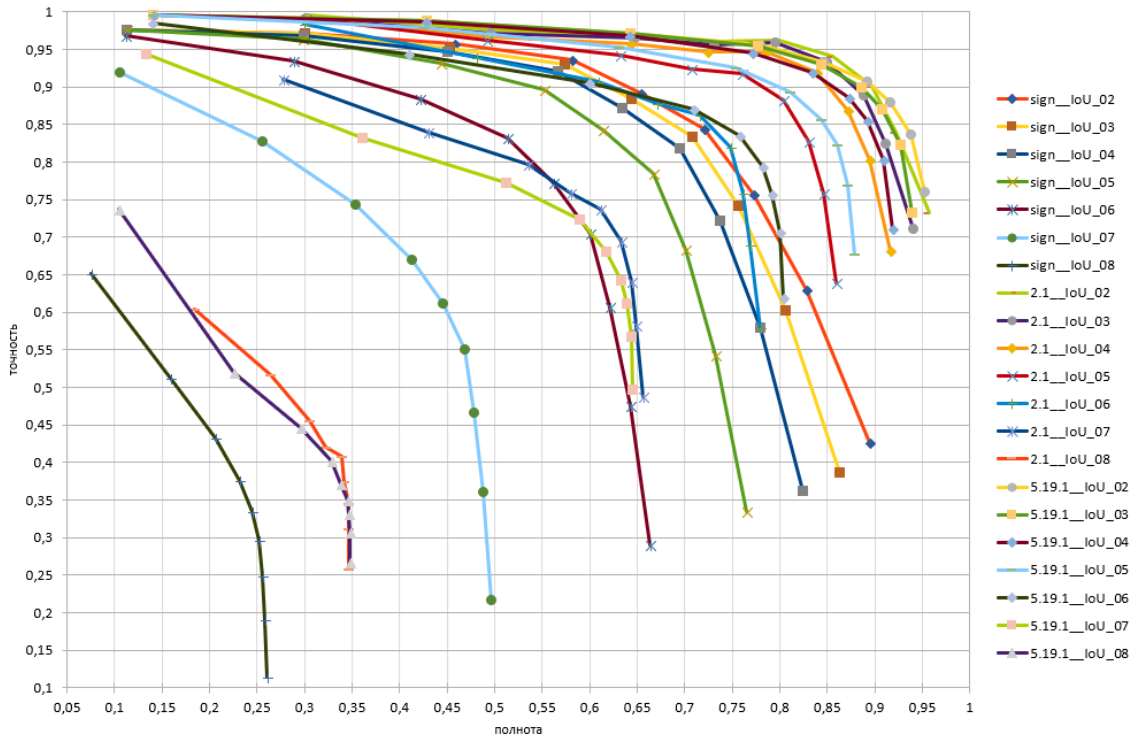


Рисунок 7 – График точности и полноты для эксперимента 3

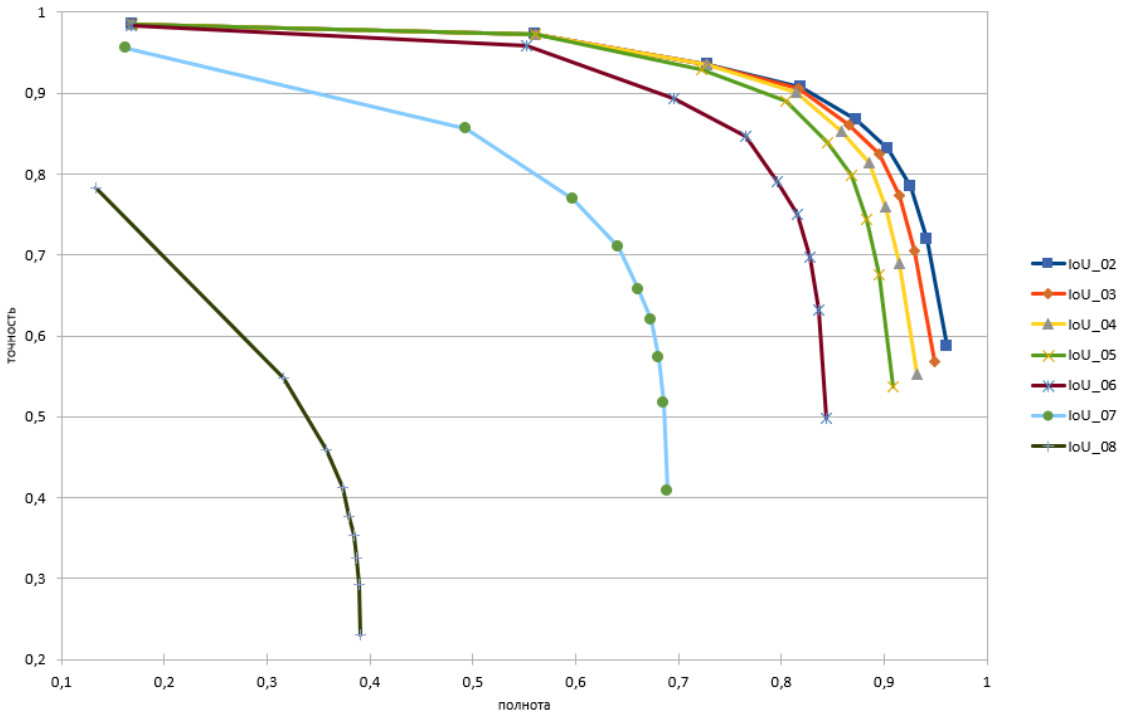


Рисунок 8 – График точности и полноты для эксперимента 4

Таблица 1. Сводная таблица результатов экспериментов

№	IoU	AP			mAP	Лучший результат						
		5.19.1	2.1	знак		Увер.	TP	FP	FN	Точ-ность	Пол-нота	T*П
1	0.2	0.89	-	-	0.89	0.4	2913	331	382	0.90	0.88	0.80
2	0.2	0.88	0.94	-	0.91	0.4	4560	431	477	0.91	0.91	0.83
3	0.2	0.91	0.93	0.82	0.89	0.4	5528	1617	815	0.77	0.87	0.67
4	0.2	-	-	0.84	0.84	0.5	2792	404	429	0.87	0.87	0.76

Как видно из таблицы, средняя точность по узким классам 5.19.1 («пешеходный переход») и 2.1 («главная дорога») довольно высока, в то время как средняя точность по суперклассу «знак» не превышает 85%. В эксперименте 3 с выборкой, содержащей и узкие классы, и суперкласс, средняя точность по всем классам ниже, чем в эксперименте 2 без суперкласса, именно из-за влияния на общий результат точности по суперклассу. При этом, точность по узким классам не претерпела значительных изменений.

Также в таблице для наглядности указаны лучшие результаты для каждого эксперимента. Лучшим результатом считался вариант с такими пороговыми значениями IoU и уверенности, при которых произведение точности и полноты (T*П) по всем классам было максимальным. В колонках TP, FP, FN указаны числа истинно-положительных, ложноположительных и ложноотрицательных обнаружений соответственно.

По полученным графикам можно заметить, что при увеличении порогового значения IoU снижаются полнота и точность, при этом при IoU более 0.5 полнота снижается в большой степени. Общепринятым значением считается пороговое значение IoU, равное 0.3, в данном случае наилучшие точность и полнота получены при IoU = 0.2.

Скорость работы для графического процессора NVIDIA GeForce GTX 1070 составила 30 кадров в секунду. Это позволяет использовать модель в режиме реального времени для указанного оборудования.

Заключение

Глубокая сверточная нейронная сеть YOLOv2 является одним из самых современных и эффективных методов для обнаружения объектов. При использовании уменьшенного варианта YOLOv2 Tiny для задачи обнаружения дорожных знаков была получена довольно высокая точность обнаружения – 84% для суперкласса «знак» и около 90% для узких классов и их сочетания с суперклассом. Скорость работы при использовании графической карты составила 30 кадров в секунду, что полностью подходит для работы в режиме реального времени. Наилучшее качество работы достигнуто при задании пороговых значений IoU=0.2 и значения уверенности от 0.4 до 0.5. Таким образом, данный метод может быть использован в практических приложениях для обнаружения знаков.

В дальнейшем следует провести эксперименты с бóльшим числом узких классов; также целесообразно добавить в обучающую выборку класс «ложное обнаружение» с объектами и фрагментами изображений, которые часто становятся ложноположительными обнаружениями, что позволит снизить число ложноположительнных обнаружений. При работе сети в режиме обнаружения этот класс можно скрыть.

1. SAE International, «Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles.», 2016. [Электронный ресурс]. Доступ: http://standards.sae.org/j3016_201609/ [Дата обращения: 19.12.2017].
2. Vavilin Andrey, Kang Hyun Jo, «Automatic Detection and Recognition of Traffic Signs using Geometric Structure Analysis» // SICE-ICASE International Joint Conference. – 2006
3. Jack Greenhalgh, Majid Mirmehdi, «Real-Time Detection and Recognition of Road Traffic Signs» // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2012. – Vol. 13, № 4. – С. 1498-1506.
4. Shaoqing Ren, Kaiming He, Ross Girshick, Jian Sun, «Faster R-CNN: Towards Real-Time Object Detection with Region Proposal Networks», 2015. [Электронный ресурс]. Доступ: https://arxiv.org/abs/1506.01497 [Дата обращения: 16.12.2017].
5. Joseph Redmon, Santosh Divvala, Ross Girshick, Ali Farhadi, «You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection», 2015. [Электронный ресурс]. Доступ: https://pjreddie.com/media/files/papers/yolo.pdf [Дата обращения: 16.12.2017].
6. Wei Liu, Dragomir Anguelov, Dumitru Erhan, Christian Szegedy, Scott Reed, Cheng-Yang Fu, Alexander C. Berg, «SSD: Single Shot MultiBox Detector», 2015. [Электронный ресурс]. Доступ: https://arxiv.org/abs/1512.02325 [Дата обращения: 16.12.2017].
7. Joseph Redmon, Ali Farhadi, «YOLO9000: Better, Faster, Stronger», 2016. [Электронный ресурс]. Доступ: https://arxiv.org/abs/1612.08242 [Дата обращения: 16.12.2017].
8. Шахуро В.И., Конушин А.С. «Российская база изображений автодорожных знаков», Компьютерная оптика, 2016
9. Amol Jayant Kale, R.C. Mahajan, «A road sign detection and the recognition for Driver Assistance Systems» // International Conference on Energy Systems and Applications. - 2015
10. TensorFlow: An open-source software library for Machine Intelligence. [Электронный ресурс] // TensorFlow. – Режим доступа: https://www.tensorflow.org/ (дата обращения: 12.09.2017).
11. Keras: The Python Deep Learning library [Электронный ресурс] // Keras documentation. – Режим доступа: https://keras.io/ (дата обращения: 12.09.2017).
12. OpenCV: Open Source Computer Vision Library [Электронный ресурс] // OpenCV. – Режим доступа: https://opencv.org/ (дата обращения: 07.04.2018).

M.D. Tuv, R.R. Khazanskii

THE DEVELOPMENT OF THE COMMUNICATION PROTOCOL LIBRARY FOR MECHATRONIC DEVICES

SPbPU, Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics, Saint-Petersburg
m.tuv@rtc.ru, r.hazansky@rtc.ru

Abstract

The article is devoted to the development of a protocol for controlling mechatronic devices that abstracts high-level communication logic from physical and data link level protocols.

Key words: protocol, control of mechatronic devices, RS-485, CAN, error-detection codes.

М.Д. Тув, Р.Р. Хазанский

РАЗРАБОТКА БИБЛИОТЕКИ КОММУНИКАЦИОННОГО ПРОТОКОЛА ДЛЯ МЕХАТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

СПбПУ, ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Санк-Петербург
m.tuv@rtc.ru, r.hazansky@rtc.ru

Аннотация

Статья посвящена разработке протокола для управления мехатронными устройствами, абстрагирующего высокоуровневую коммуникационную логику от протоколов физического и канального уровней.

Ключевые слова: протокол, управление мехатронными устройствами, RS-485, CAN, коды обнаружения ошибок.

Введение

Для унификации программного обеспечения для управления мехатронными устройствами требуется высокоуровневый протокол, абстрагированный от физического и канального уровня [1]. Существующие протоколы привязаны к определенным интерфейсам, в связи с чем было принято решение разработать новый протокол. На данный момент разработанный протокол поддерживает коммуникацию через RS-485 и CAN.

Обзор существующих протоколов и физических интерфейсов

Распространенными интерфейсами, используемыми в промышленной коммуникации, являются Recommended Standard 232, 422 и 485 (RS-232, RS-422 и RS-485) [2]. Сравнение интерфейсов представлено в табл. 1 [3].

Таблица 1. Сравнение интерфейсов RS-232, RS-422 и RS-485

	RS-232	**RS-422**	**RS-485**
Максимальное расстояние передачи	15 м	1200 м	1200 м
Максимальная скорость	19,2 кБод	10 МБод	10 МБод
Максимальное количество подключенных устройств	1 передатчик и 1 приемник	1 передатчик и 10 приемников	32 передатчика и 32 приемника
Тип сигнала	асимметричный сигнал	дифференциальный сигнал	дифференциальный сигнал
Топология	точка-точка	точка-точка, многоточечная шина	точка-точка, многоточечная шина, общая шина

Подключение устройств по топологии многоточечной шины подразумевает то, что каждое ведомое устройство подключается непосредственно к ведущему. При использовании топологии общей шины все устройства подключаются к общему кабелю.

Наиболее предпочтительным интерфейсом является RS-485, основные преимущества которого – использование дифференциального сигнала, использование общей шины и возможность подключения более одного ведомого устройства. Использование дифференциального сигнала, т.е. разности потенциалов между двумя проводниками, позволяет снизить влияние шумов на передаваемые данные, т.к. помехи одинаково воздействуют на оба кабеля, не изменяя разность потенциалов между ними.

Среди протоколов промышленной коммуникации можно выделить CAN, ModBus, ProfiBus, SMBus и Ethernet Powerlink. Их сравнение по основным характеристикам представлено в табл. 2.

Таблица 2. Сравнение протоколов CAN, ModBus, ProfiBus, SMBus и Ethernet Powerlink

	CAN	**ModBus**	**ProfiBus**	**SMBus**	**Ethernet Powerlink**
Допустимые физические уровни	–	RS-232, RS-422, RS-485, Ethernet	RS-485	I2C	Ethernet
Допустимая топология	общая шина	общая шина, звезда	общая шина, звезда, дерево	общая шина	общая шина, звезда
Арбитраж	неразрушающий арбитраж	нет	token passing	неразрушающий арбитраж	-
Метод обнаружения ошибок	15-битный CRC	16-битный CRC или LRC	4-байтный CRC	8-битовый CRC	-

Среди рассмотренных протоколов наибольший интерес представляет CAN, подходящий для систем, требующих передачи большого числа коротких сообщений, когда данные необходимо передавать не только одному узлу. Основным преимуществом протокола является неразрушающий арбитраж, использующийся для разрешения конфликтов при одновременном начале передачи данных несколькими узлами. Если один узел передает доминантный бит (логический ноль) идентификатора, а другой – рецессивный бит (логическая единица), то узел, передающий доминантный бит, выигрывает и продолжает отправку сообщения. Остальные узлы ждут окончания передачи. Наивысший приоритет имеет узел с наименьшим значением идентификатора. При этом может возникнуть ситуация, когда сообщение от узла с наименьшим приоритетом никогда не будет передано [4].

Другим вариантом арбитража является token passing, при котором устройство может начать передачу данных только после получения специального пакета (token), который после окончания передачи отправляет другому устройству [5].

Обзор кодов обнаружения и исправления ошибок

При передаче данных неизбежно возникновение ошибок, связанных с воздействием шумов на каналы связи. Шумовые сигналы являются случайными, что ведет к невозможности предсказания их появления, и неизбежными при ненулевой температуре. В связи с этим возникает потребность в использовании методов кодирования информации, позволяющих обнаружить и, по возможности, исправить ошибки передачи. Построение таких кодов основано на избыточности, т.е. введении дополнительных данных, с помощью которых можно проверить правильность сообщения [6]. Среди кодов можно выделить коды обнаружения ошибок (простая контрольная сумма, LRC, CRC), алгоритмы криптографического хеширования (MD5, SHA-1, SHA-256) и коды обнаружения и исправления ошибок (код Рида-Соломона, сверточное кодирование и декодирование Витерби). Сравнение указанных кодов представлено в табл. 3, для всех из них существуют готовые реализации.

Таблица 3. Сравнение кодов обнаружения и исправления ошибок

	Простые контрольные суммы	**CRC**	**MD5**
Сложность вычислений	Низкая	Низкая	Высокая
Количество и тип обнаруживаемых ошибок	Единичные ошибки и некоторые блочные	Блочные ошибки длиной по числу бит генераторного полинома	Вероятность совпадения дайджестов двух сообщений $1/2^{128}$
Количество и тип исправляемых ошибок	Не исправляет	Не исправляет	Не исправляет
Размер избыточности	1 бит для контроля четности; 8 бит для 8-битной контрольной суммы; 8, 16, 32 бита для LRC	Любой, как правило 8, 16 или 32 бит	128 бит

Окончание таблицы 3

	SHA-1 и SHA-256	**Код Рида-Соломона**	**Сверточное кодирование и декодирование Витерби**
Сложность вычислений	Высокая	Высокая	Высокая
Количество и тип обнаруживаемых ошибок	Вероятность совпадения дайджестов двух сообщений $1/2^{160}$ для SHA-1 и $1/2^{256}$ для SHA-256	Блочные ошибки длины избыточности	Блочные ошибки длины $(d-1)/2$, где d – минимальное кодовое расстояние
Количество и тип исправляемых ошибок	Не исправляет	Блочные ошибки длины половины избыточности	Блочные ошибки длины $(d-1)/2$
Размер избыточности	160 бит для SHA-1 и 256 бит для SHA-256	Любой, как правило 4 байта	От 1 до 7 байт

Наиболее приемлемым методом кодирования является циклический избыточный код (CRC), обладающий низкой сложностью вычислений при высокой способности обнаружения ошибок передачи данных [7].

Описание реализуемого протокола

Основным недостатком всех рассмотренных ранее протоколов является их жесткая привязка к конкретному канальному или физическому интерфейсу. Поскольку при разработке мехатронных устройств достаточно часто приходится использовать различные интерфейсы канального и физического уровня, возникает необходимость унификации протокола прикладного уровня.

Разрабатываемый протокол является протоколом прикладного уровня, работающим по принципу «ведущий-ведомый», и не имеющим жесткой привязки к конкретному физическому или канальному уровню.

Каждое ведомое устройство имеет индивидуальное пространство регистров, подразделяющееся на RO-регистры, предназначенные для чтения ведущим устройством, и WO-регистры, предназначенные для записи ведущим устройством. Соответственно взаимодействие осуществляется либо опросом состояния ведомого (запрос на чтение регистра), либо передачей команды на

выполнение (запрос на запись регистра). Все регистры являются 32-битными, при этом предусмотрена работа с ними как с 8-битными или 16-битными.

На данный момент реализует взаимодействие на основе интерфейсов CAN и RS-485. Для возможности передачи данных различного объема для каждого интерфейса существует два формата сообщений: короткий и длинный. Структура пакетов на основе RS-485 представлена в табл. 4 и 5.

Таблица 4. Структура пакета на основе RS-485 (короткий формат)

Поле	**Длина, байт**	**Возможные значения**
Стартовый байт	1	0xA0, 0xA1
Адрес ведомого устройства	1	0-255
Счетчик и длина пакета данных	1	0-255
CRC8 на заголовок	1	0-255
Данные	1-15	0-255
CRC8 на пакет данных	1	0-255

Таблица 5. Структура пакета на основе RS-485 (длинный формат)

Поле	**Длина, байт**	**Возможные значения**
Стартовый байт	1	0xB0, 0xB1
Адрес ведомого устройства	1	0-255
Счетчик и длина пакета данных	1	0-255
CRC8 на заголовок	1	0-255
Данные	1-15	0-255
CRC16 на пакет данных	2	0-65535

Стартовые байты 0xA0, 0xB0 указывают на запрос ведущего, 0xA1, 0xB1 – на ответ ведомого. Адрес 0 используется для широковещательной передачи всем ведомым устройствам, адрес 255 используется для обращения к любому ведомому устройству, независимо от его адреса. В поле «счетчик и длина пакета данных» старшие четыре бита отведены под инкрементальный номер пакета, младшие – под длину пакета данных.

При передаче данных по интерфейсу CAN каждое сообщение должно иметь идентификатор, определяющий приоритет передачи. Наивысший приоритет имеют сообщения с наименьшим идентификатором. Структура идентификатора представлена в табл. 6.

Таблица 6. Структура идентификатора кадра на основе CAN

Поле	**Длина, бит**	**Возможные значения**
Код типа сообщения	2	0b00 – 0b11
Адрес ведомого устройства	7	0b0000000 – 0b1111011
Счетчик	2	0b00 – 0b11

Протокол предусматривает следующие типы сообщений: высокоприоритетное сообщение ведущего (0b00), высокоприоритетное сообщение ведомого (0b01), запрос ведущего (0b10) и запрос ведомого (0b11).

Короткий формат пакета на основе CAN используется, если пакет данных полностью помещается в один пакет CAN (8 байт). В противном случае данные разбиваются на несколько пакетов. Структуры пакетов короткого и длинного форматов представлены в табл. 7, 8 и 9.

Таблица 7. Структура пакета на основе CAN (короткий формат)

Поле	**Длина, байт**	**Возможные значения**
Количество пакетов	1	1
Данные	7	0-255

Таблица 8. Структура первых пакетов на основе CAN (длинный формат)

Поле	**Длина, байт**	**Возможные значения**
Количество пакетов	1	2-255
Номер текущего пакета	1	0-255
Данные	6	0-255

Таблица 9. Структура последнего пакета на основе CAN (длинный формат)

Поле	**Длина, байт**	**Возможные значения**
Количество пакетов	1	2-255
Номер текущего пакета	1	0-255
Данные	4	0-255
CRC16	2	0-65535

Пакет данных включает в себя байт идентификатора, определяющий содержимое данных, и непосредственно данные. Старшая тетрада идентификатора может принимать следующие значения: 0x0 – запрос ведущего устройства, 0xA – ответ ведомого устройства, 0xE – ответ ведомого устройства об ошибке. Младшая тетрада содержит код функции, указывающей на действия, которые необходимо сделать с данными. Возможные значения и описание функций приведены в табл. 10.

Таблица 10. Возможные значения младшей тетрады идентификатора

Код	**Функция**	**Код**	**Функция**
0	Чтение диапазона регистров 8-бит	7	Чтение серии разрозненных регистров 16-бит
1	Чтение диапазона регистров 16-бит	8	Чтение серии разрозненных регистров 32-бит
2	Чтение диапазона регистров 32-бит	9	Запись серии разрозненных регистров 8-бит
3	Запись диапазона регистров 8-бит	10	Запись серии разрозненных регистров 16-бит
4	Запись диапазона регистров 16-бит	11	Запись серии разрозненных регистров 32-бит
5	Запись диапазона регистров 32-бит	12-15	Выполняемые функции зависят от конкретной реализации ведомого устройства
6	Чтение серии разрозненных регистров 8-бит		

Заключение

Проведен обзор физических интерфейсов и протоколов, а также кодов обнаружения и исправления ошибок. Представлено описание разрабатываемого протокола на основе интерфейсов RS-485 и CAN.

1. Ронжин А.Л., Басов О.О., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Концептуальная и формальная модели синтеза киберфизических систем и интеллектуальных пространств // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2016. – Т. 59, № 11. – С. 897-905.
2. Parpala R.C. Application of IoT concept on predictive maintenance of industrial equipment / R.C. Parpala, R. Iacob // 8th International Conference on Manufacturing Science and Education – MSE 2017 “Trends in New Industrial Revolution”. – 2017. – №121.
3. Vyas R. Development of SoC for Interfacing Avionics Units with ARINC 429 Bus / R. Vyas, A. Bhattacharjee, A. Khandelwal // The LNM Institute of Information Technology. – 2016.
4. Introduction to the Controller Area Network (CAN). Application Report. – Texas Instruments. – 2016.
5. Dias A.L. Performance Analysis of Profibus DP and Profinet in a Motion Control Application / A.L. Dias, G.S. Sestito, D. Brandao // Journal of Control, Automation and Electrical Systems. – 2017. - № 28. – С. 86-93.
6. Kirse H. Studies in Error Correction Coding / H. Kirse // Liberty University. – 2014.
7. Koopman P. Cyclic Redundancy Code (CRC) Polynomial Selection For Embedded Networks / P. Koopman, T. Chakravarty // The International Conference in Dependable Systems and Networks. – 2004.

A.G. Kurochkin, P.V. Lotorev, V.V. Varganov, E.A. Titenko

THE SCHEME OF THE DATA INTEGRATION FOR THE CONTROL SYSTEM OF THE MOBILE ROBOT

South West State University, Kursk
ak76.kursk@gmail.com, pashik_email@mail.ru, npcvvv@yandex.ru, johntit@mail.ru

Abstract

The work contains a description of the structure of the mobile robot control system. The modern direction of intellectualization of functions of the mobile robot is associated with the creation of technical means and information technologies for analyzing the situation and making decisions on board the robot. The structure of the control system is hierarchical and contains 2 levels of control. The lower level controls the processes of direct control and management of devices and organs. The upper level controls the planning and implementation of independent movement and the implementation of targets. The lower-level control system has a classical structure. It represents a system for measuring and collecting data. The top-level control system has a combined structure combining cybernetic control principles and elements of artificial intelligence. It consists of interacting planning modules, describing the environment and executing commands. The most important place in providing decision-making is given to the processes of combining heterogeneous data from various sensors and sensors. The scheme for combining heterogeneous data has three levels of unification. It is modular in composition and conveyor by the scheme of calculations. The scheme is expanded or reduced to a set of technical means of measurement, surveying, scanning available in the mobile robot. The modularity of the scheme for combining heterogeneous data makes it applicable to a representative class of mobile robots. The most important stage of integration is the second level. Here, data sources that share a common measurable feature are combined into pairs. The pairs of operands are represented by matrices, the result of the union is the resulting matrix, the data vectors to be analyzed and rendered. Thus, the novelty of the mobile robot control system is determined by a special module for combining heterogeneous data in the system of technical vision. The obtained data aggregation is necessary for independent decision making on board the mobile robot.

Key words: mobile robot, control system, technical vision system, data integration.

А.Г. Курочкин, П.В. Лоторев, В.В. Варганов, Е.А. Титенко

СХЕМА КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ ДАННЫХ ДЛЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНЫМ РОБОТОМ

Юго-Западный государственный университет, г. Курск
ak76.kursk@gmail.com, pashik_email@mail.ru, npcvvv@yandex.ru, johntit@mail.ru

Аннотация

В работе рассматривается подход к созданию структуры системы управления (СУ) подвижным роботом. Современное направление интеллектуализации функций подвижного робота связывается с созданием технических средств и информационных технологий анализа обстановки и принятия решений на борту робота. Организация СУ имеет иерархическую структуру, содержащую 2 уровня. Нижний уровень отвечает за процессы непосредственного контроля и управления устройствами и органами подвижного робота. Верхний уровень контролирует процессы планирования и реализации самостоятельного движения и выполнения целевых задач. СУ нижнего уровня имеет классическую структуру. Она представляет систему измерения и сбора данных. СУ верхнего уровня имеет комбинированную структуру, сочетающую кибернетические принципы управления и элементы искусственного интеллекта. Она состоит из взаимодействующих модулей планирования, описания окружающей среды и исполнения команд. Важнейшее место в обеспечении принятия решения отводится процессам объединения разнородных данных от различных датчиков и сенсоров. Схема комплексирования разнородных данных имеет три уровня объединения. Она является модульной по составу и конвейерной по схеме вычислений. Схема расширяется или сокращается до набора имеющихся в подвижном роботе технических средств измерения, съемки, сканирования. Модульность схемы комплексирования разнородных данных делает ее применимой для представительного класса

подвижных роботов. Важнейшим этапом комплексирования является второй уровень. Здесь объединяются в пары источники данных, имеющие общий измеряемый признак. Пары операндов представляются матрицами, результат объединения – итоговая матрица, вектора данных, подлежащие анализу и визуализации. Таким образом, новизна системы управления подвижным роботом определяется специальным модулем комплексирования разнородных данных в составе системы технического зрения. Полученная агрегация данных необходима для самостоятельного принятия решений на борту подвижного робота.

Ключевые слова: робот, система управления, система технического зрения, комплексирование данных.

Движение робота понимается как обособленный вид работы, непосредственно связанный с выполнением типовых элементов движения в условиях неопределенности окружающей обстановки и формированием рационального (оптимального) маршрута движения. Одним из автоматизированных способов уменьшения такой неопределенности является синтез СУ, имеющей возможности как для поддержки расчетных задач по контролю состояния и исполнения команд движения, так и по обеспечению поисковых задач в условиях неопределенности, неполноты исходных данных. Важнейшей задачей является задача формирования и/или коррекции маршрута движения. Решение задачи связано с привлечением значительных вычислительных и емкостных ресурсов (фильтрация, поворот участков растра, подготовка картограммы проходимости, генерация и проверка альтернатив участков маршрута, глобальные нерегулярные проверки геодезических и топологических свойств объектов местности, автоматизированный учет сезонных и иных изменений участков местности, гидрографических объектов, синтез 3D-модели и др.). Применение вычислительных ресурсов большого объема порождает проблему эффективных вычислений, выполняемых на борту подвижного робота. Для ее преодоления предлагается подход, основанный на комбинации расчетных и интеллектуальных действий и создании соответствующей системы управления.

Современные условия развития наземных робототехнических комплексов (РТК) связываются с интеллектуализацией возможностей его функциональных систем и системы управления. Приоритетное критическое направление интеллектуализации возможностей РТК связывается с созданием средств и технологий анализа обстановки и принятия решений на борту машины с минимальным участием человека. Тем не менее, вопросы объединения современных достижений в области мехатроники, бионики, вычислительной техники, машиностроения, баллистики, и др. по-прежнему осуществляются, в основном, экстенсивным путем. Вследствие этого полученные технические решения не имеют системной оценки и единого плана развития робототехнической отрасли. Прежде всего, этот вопрос касается средств очувствления РТК, т.е. создания комплексной системы технического зрения, способной оперативно формировать объективную модель динамично меняющейся и неопределенной окружающей среды.

Очевидно, что при наличии различного рода неопределенностей при случайном характере внешних воздействий, к которым можно отнести непредусмотренное изменение фоно-целевой обстановки, собственных эксплуатационных характеристик объекта управления и параметров среды, высокий уровень автономности работы, адаптивности режимов работы систем управления должен обеспечиваться за счет повышения их интеллектуальных возможностей. Можно выделить современные информационно-технические требования к системам управления подвижных роботов:

– построение системы управления по распределенному принципу с использованием как универсальных, так и специализированных вычислительных средств;

– использование мощной бортовой вычислительной системы, способной как производить алгоритмические вычисления, так и обрабатывать достаточно большие параллельные информационные потоки;

– применение многоканальной системы локальной навигации;

– наличие системы разнородных средств технического зрения, способной работать в условиях пониженной освещенности и сложных метеоусловиях;

– наличие высокоскоростных, помехозащищенных каналов связи и управления.

В работе рассматривается системный подход к созданию иерархической СУ, способной комплексировать разнородные данные для последующего анализа и самостоятельного принятия решений на борту РТК.

Предлагается структурная организация СУ в виде иерархической системы, разграничивающей процессы непосредственного контроля и управления устройствами и органами (нижний уровень управления) и процессы планирования и реализации самостоятельного движения и выполнения целевых задач (верхний уровень управления). Такое разграничение является основой модульного построения СУ, оно экономит ресурсы и обеспечивает автономность выполняемых роботом работ [1]. Кроме того, для систематического учета разнородных требований к движению РТК в условиях неопределенности представляется целесообразным использовать иерархический подход к построению СУ, сохраняющий преемственность решений и наработок для дистанционно управляемых и полуавтономных наземных роботов на нижнем (исполнительном) уровне управления.

СУ нижнего уровня имеет классическую структуру (рис.1). Она фактически представляет систему измерения и сбора данных о состоянии исполнительных агрегатов, узлов, функциональных подсистем (АУП) с помощью модуля приёмо-передачи данных (модуль ПП). Робот в этом случае понимается как подвижный непрограммируемый исполнитель команд, в том числе команд движения. Сенсорные средства ввода данных об окружающей среде непосредственно передают/транслируют оператору без первичного анализа и обработки исходную информацию. Фактически система управления подвижным роботом представляет систему измерения и сбора данных о состоянии исполнительных АУП и получения первичной (видео-, аудио-, инфракрасной, радиолокационной, измерительной и другой) информации. Самостоятельное принятие решения по планированию движения выходит за рамки этой системы.

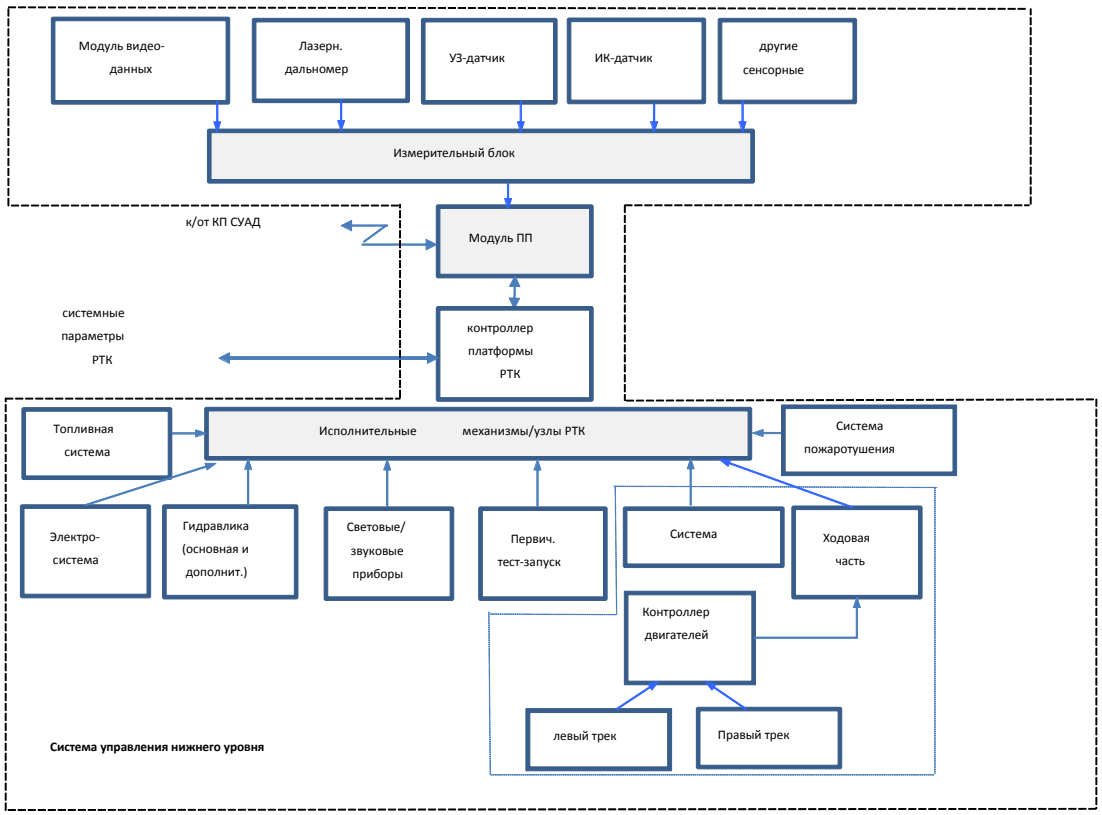


Рисунок 1 – Структура СУ нижнего уровня

Объектом детального рассмотрения служит СУ верхнего уровня, решающая слабоформализованные, проблемно-поисковые задачи, в том числе автоматического планирования маршрута на заранее неизвестной и неподготовленной местности. В целом, она предназначена для автоматизации задач планирования, исполнения и контроля работ поисково-аналитического характера. Их решение призвано дополнить и/или заменить действия оператора в условиях разнородных данных о состоянии машины и окружающей обстановки

СУ верхнего уровня имеет комбинированную структуру, сочетающую кибернетические принципы управления и элементы искусственного интеллекта (база знаний, вывод на основе правил как основа вычислений, интерпретация результата и др.) [2,3].

Общая схема СУ верхнего уровня имеет следующее представление (рис.2). Она состоит из взаимодействующих модулей планирования работ (прежде всего движения), описания окружающей среды и исполнения команд.

В состав СУ верхнего уровня входят следующие информационно-управляющие компоненты:

– модуль синтеза окружающей среды – описывает состояния окружающей среды с учетом законов поведения объектов (пассивных и активных, в статике и динамике по времени);

– модуль идентификации и распознавания объектов, прогнозирования их поведения по заложенным метаданным;

– модуль обработки изображений объектов;

– модуль генерации/коррекции планов работ;

– модуль управления целями;

– модуль комплексирования разнородных данных.

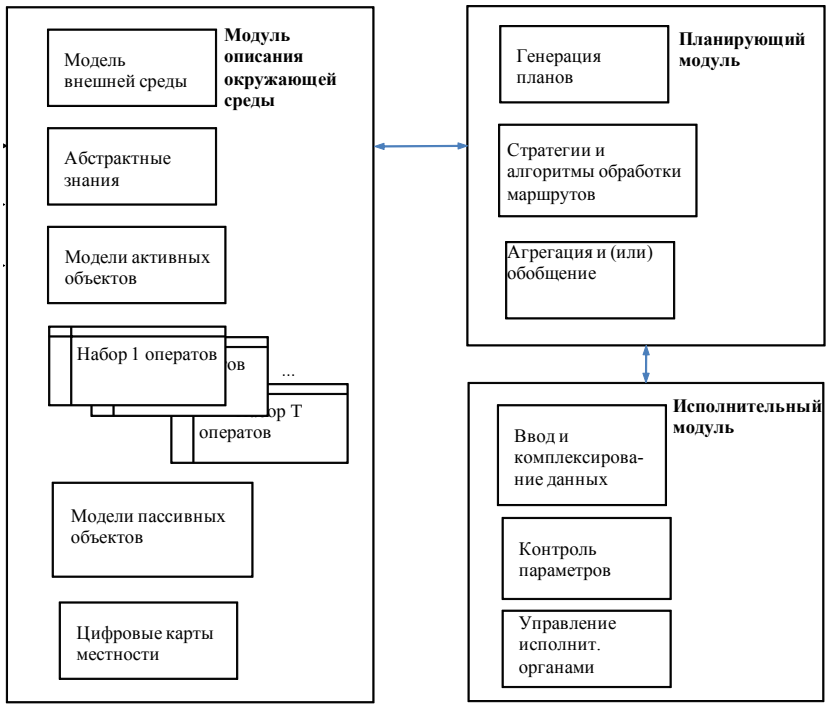


Рисунок 2 – Общая схема СУ (верхний уровень)

Модуль синтеза окружающей среды создается на основе заложенных типовых сцен и выполняет функцию запоминания состояния объектов и их характеристик, существенных для процессов движения. Задачей модуля идентификации и распознавания является обнаружение средствами системы технического зрения (СТЗ) видовых объектов, определение их характеристик. Модуль обработки данных от разнородных датчиков из состава СТЗ об окружающих объектах решает комплексную задачу определения и отображения их расположения на карте местности. В процессе движения в РТК формируется и постоянно обновляется модель окружающей среды. Результат работы СУ верхнего уровня является не только (пере)построение маршрутов движения, но и накопление данных об объектах окружающей среды (координаты, размер, семантика, вид исходящей угрозы и др.), попавших в локальную окрестность движущегося робота.

Важнейшее место в обеспечении принятия решения отводится процессам объединения разнородных данных от различных датчиков и сенсоров (видео, радары, лидары и др.). Основным направлением развития системы технического зрения является комплексирование данных от различного типа средств ввода данных в РТК: стереозрение, лазерные сканеры, ультразвуковые датчики, радары ближнего действия и др. По отдельности каждый тип датчиков и сенсоров предоставляет частичный объём данных об окружающей среде. Комплексирование – это

синхронизированное по времени совмещение на общий объект окружающей среды измеренных характеристик, имеющих общую начальную точку в единой системе координат. Оно в состоянии снять эти ограничения или существенно уменьшить неопределенность оценки обстановки. Благодаря совмещению выходных потоков от различных типов датчиков СТЗ может построить непротиворечивую и полную модель окружающей среды. Данная модель, в дальнейшем, позволит РТК строить и/или корректировать маршруты движения робота при наличии ограничений (поиск в трёхмерном пространстве, выбор наилучших вариантов поверхности для движения, объезд потенциально опасных участков местности и т.д.), а также информировать о вновь выявленных объектах, РТК- соседей при действии в составе группировки.

Достижение тактического превосходства РТК в условиях конфликта обеспечивается возможностью генерации альтернативных действий, динамического варьирования видами движений, что должно быть связано с введением в общий цикл управления поисковых методов и алгоритмов. Последние способны наряду с детерминированными расчетно-логическим действиями также выполнять поисковые преобразования и ситуационно выдавать новые решения, не запланированные ранее.

Комплексирование входных данных целесообразно распределить между СУ нижнего и верхнего уровней, обеспечивая использование всех источники данных (датчики и сенсоры) и метаданные из базы данных и правила вывода из базы знаний для отработки типовых и нештатных ситуаций.

Для упорядочения процессов комплексирования и выработки общего объединяющего подхода предлагается иерархическая (трехуровневая) схема комплексирования разнородных данных.

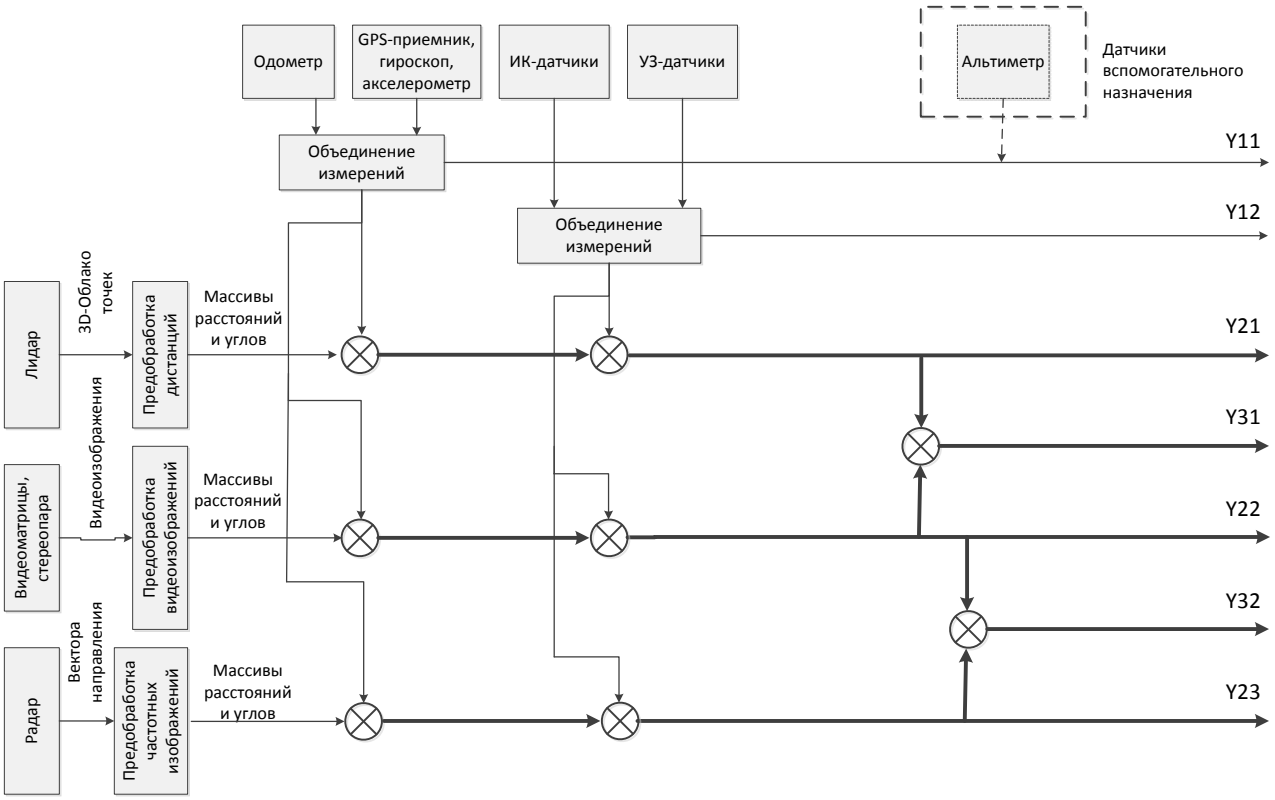


Рисунок 3 – Иерархическая схема комплексирования данных

Данная схема комплексирования является модульной по составу и конвейерной по схеме вычислений. Она может расширяться или сокращаться до номенклатуры имеющихся в подвижном роботе технических средств измерения, съемки, сканирования. Эта возможность делает применимой схему для представительного класса подвижных роботов и задач обработки данных на словесном, реляционном и более высоких уровнях абстракции [4].

Первый и второй этапы комплексирования связаны с объединением пары источников данных, один из которых представляется точечным объектом, формирующим скалярные данные. Второй операнд – массив измеренных данных. Объединение скаляра и массива данных используется в

операциях автомасштабирования, поворота и др. Важнейшим этапом комплексирования является третий уровень. На нем объединяются в пары такие источники данных, имеющие общий измеряемый признак (дистанции, удаления, расстояния), описываемый массивами данных различной размерности. Объединение пары массивов данных, имеющих различную размерность, осуществляется с применением технологии «master - slave». В зависимости от внешних условий выделяется первый операнд как «master», второй операнд назначается как «slave» В дальнейшем в этой паре операндов на комплексирование master-операнд задает управляющий (селективный) процесс, по которому осуществляется выделение синхронизированных данных из slave-операнда (второй операнд) для последующей обработки.

Детализированная СУ для наземного верхнего уровня содержит три уровня комплексирования данных (рис.3). Третий уровень комплексирования в системе управления верхнего уровня использует базы правил и системных параметров РТК для агрегации данных, т.е. семантического уменьшения объема полученной от датчиков и сенсоров информации и их представления в модели окружающей среды в виде типовых сцен, видовых объектов.

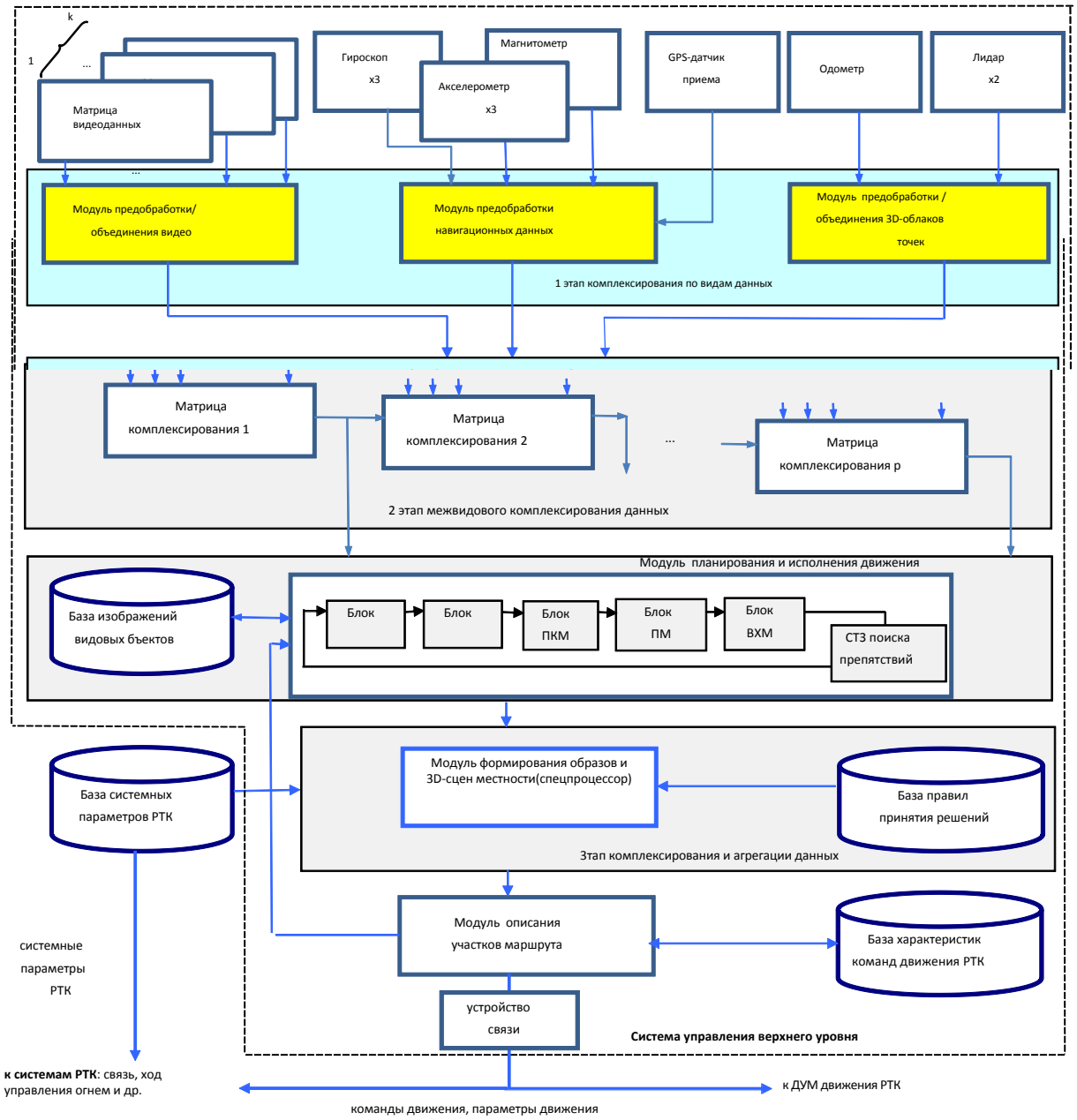


Рисунок 4 – Структура СУ верхнего уровня

На рис.4 обозначено: ЦКМ – цифровая карта местности, НВ – навигационные вычисления, ПКМ – построение картограммы проходимости, ПМ – планирование маршрута, ВХМ – вычисление характеристик маршрута. СУ имеет линейно-итерационную структуру. Центральное место в ней занимают модули межвидового комплексирования (на основе конвейерных матриц) и планирования и исполнения движения. В последнем модуле осуществляется цикл поиска маршрута, оценки его характеристик с учетом вновь выявленных препятствий. Эта особенность организации позволяет роботу при планировании движения выполнять этапы межвидового комплексирования и агрегации данных с привлечением БД видовых объектов, базы знаний для ситуационной оценки окружающей среды. Предложенный подход к построению СУ апробирован на изделиях «Уран-9» и «Соратник». Полученные результаты подтверждают его справедливость и предлагаемые направления дальнейшего совершенствования СУ РТК.

Таким образом, создана СУ, имеющая два уровня управления для иерархического объединения данных и построения модели окружающей среды. Ядро СУ составляет специальный модуль комплексирования разнородных данных в составе СТЗ. Этот модуль осуществляет парные объединения массивов измерений. Имеющих различные размерности. В дальнейшем полученные данные служат основой для агрегации информации и последующего самостоятельного принятия решений на борту подвижного робота.

1. Макаров И.М., Лохин В.М. Интеллектуальные системы автоматического управления. М.: Наука, 2001. 576 с.
2. Люгер Дж. Ф. Искусственный интеллект: стратегии и методы решения сложных проблем. М.: Вильямс. 2003. 864 с.
3. Лоторев П.В., Курочкин А.Г. Гривачев А.В. Математическая модель динамической коррекции маршрута подвижного робота // Наукоемкие технологии. 2016. Т. 17. № 3. С. 21-25.
4. Довгаль В.М., Титов В.С., Титенко Е.А. Стратегии быстрых символьных вычислений для исчислительной продукционной системы // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2008. Т. 51.№ 2. С. 44-47.

M.B. Ignatiev, A.V. Korshunov, R.V. Kleimenov, O.O. Zharinov,
V.A. Nenashev, J.A. Lipinski, P.I. Makin

PROBLEMS IN THE DEVELOPMENT AND USE OF AUTONOMOUS ROBOTS FOR DIAGNOSTICS OF GAS PIPELINES

Saint-Petersburg State University of aerospace instrumentation

Abstract

Are considered problems of creation and use of Autonomous robots for diagnostics of gas pipelines, energy supply, wireless communications systems with the big memory and navigation.

Keywords: robotics, autonomy, energy, wireless communication, big memory, navigation, gas pipeline diagnostics.

Introduction

The use of robots for monitoring, diagnostics and repair of pipelines have not yet been developed, although the various pipes are the basis of modern civilization is the water supply and sewerage, oil and gas pipelines, chemical production and energy. The total length of gas pipelines in Russia exceeds 250 thousand kilometers. Pipe wear, corrosion and deformation, therefore, need monitoring and diagnosis to prevent accidents. There is a large arsenal of tools to solve this problem, but they need improvement. Robots for in-line inspection of gas pipelines are divided into two large classes – autonomous from the point of view of energy supply and communication with the operator and nonautonomous, which get energy and communications by wire and which can operate at distances up to 300 meters from the energy source [1,2,3,9]. In the article are considered problems of creation and operation of primarily autonomous robots.

The problem of power supply of Autonomous robots

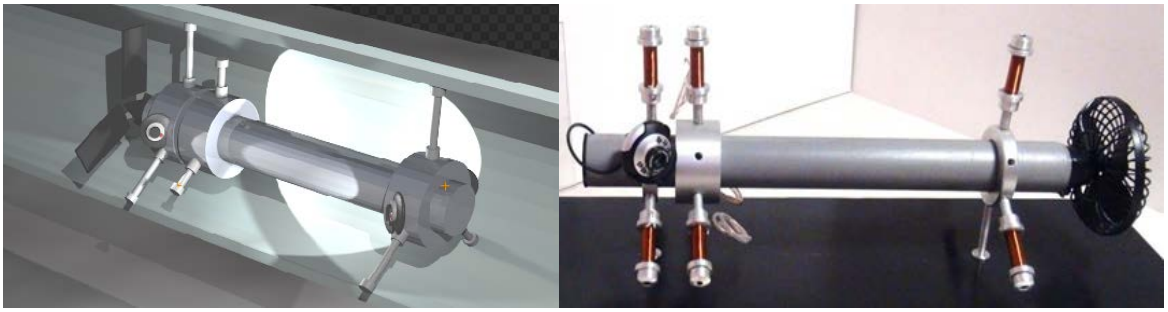
The most common diagnostic devices are shells flaw detectors, which use the pressure created by the gas inside the pipeline through the use of lip seals and which move with great speed as shells, making it difficult to diagnose and does not allow to explore in detail the area of the defect [1].

When creating an Autonomous robot for the diagnostics of gas pipelines it is necessary to solve a number of problems with the features of piping systems that affects the design of robots, their energy, sensing, navigation, control and communication. The long length of pipeline systems – many kilometers – nominate in the first place the problem of energy supply of the robot wirelessly and the problem of wireless communication of the robot with the operator.

Our proposed adaptive Autonomous robot [2, 3], Fig. 1, draws its energy from the gas stream. The power turbine is expressed as follows:

$$P=\eta \cdot V^3 \cdot S_0 \cdot \rho$$

where: P – power, η – efficiency of energy conversion in the turbine (according to the law of Betz [4] theoretically cannot exceed 0.5), V is the flow velocity, the So – sweeping area of the turbine, ρ is the gas density.



Имитируемый процесс диагностики Макет робота

Рисунок 1 – Автономный шагающий адаптивный робот для диагностики газопроводов

Expressing the flow rate, and using the continuity equation, we can obtain the volumetric flow rate of gas in the pipe required to maintain the required power generated by the turbine.

In the proposed concept of adaptive autonomous robot for diagnostics of pipelines used two sizes of expansion turbines for electricity generators: with impeller diameter equal to 85 mm and 200 mm for pipes

with nominal diameter 100 and 400...300...1450 mm, respectively. For these sizes of turbo expanders was estimate calculations of required gas consumption based on shaft power of the generator equal to 60 watts (see table 1...3).

Table 1. Volumetric flow rates (m3/h) needed to generate power of 60 watts. Diameter of working wheel of turbo-expander 85 mm.

Natural gas	**Nominal diameter Dn, mm**		
Pressure, kgf/cm^2	**100**	**200**	**300**
1	1065	3821	5417
5	622	2238	3179
10	495	1775	2518

Table 2. Volumetric flow rates (m3/h) needed to generate power of 60 watts. The diameter of the impeller turboexpander 200 mm.

Natural gas	**Nominal diameter Dn, mm**		
Pressure, kgf/cm^2	**400**	**600**	**1000**
1	9631	18618	51716
5	5652	10886	30238
10	4476	8648	24021

Table. 3. Volumetric flow rates (m3/h) needed to generate power of 60 watts. Diameter of working wheel of turbo-expander 85 mm. In test modes instead of natural gas often use air

Air	**Nominal diameter Dn, mm**		
Pressure, kgf/cm^2	**100**	**200**	**300**
1	873	3493	7859
5	509	2035	4578
10	404	1616	3637

These tables illustrate the modes of energy supply for different pipe diameters and gas flow rate.

Communication system

To provide remote control, synchronization and information from the robot, it is necessary to implement a special communication system, taking into account the specifics of the work and the environment, which is implemented in two versions: first, the pipeline itself acts as a waveguide. This system should provide wireless transmission of information from the robot sensors to the remote control and receiving control commands and instructions from the operator, but this is not always possible depending on the configuration of the pipeline pipe. Therefore, the second option was developed-images from video cameras installed on the robot is stored in the robot's large memory, taking into account the location of the video, then this information is processed by the operator and special programs to detect defects. The system is made in the form of two blocks, one of which is on the job, the second – on the side of the operator.

To ensure remote control, and synchronization information from the robot is necessary to implement ad hoc wireless communication system, taking into account the specifics of work and environment. The propagation medium itself is a pipe of the pipeline, which can be used as a waveguide. In order to provide radio communication with the robot, the carrier frequency of the radio signal must be a multiple of the diameter of the pipeline, to enable communication, without intermediate amplifiers, at a distance of 50 kilometers. This system should provide wireless transmission of information from sensors of the robot on the remote control and receiving control commands or instructions from the operator. The communication module should provide the required bandwidth for transmitting video information in real time that allows to perform a qualitative examination of the cavity of the pipe at the time of diagnosis robot. The system is made of two blocks, one of which is really work, the second on the operator's side. Required data transfer speeds of about 50 Mbps, which is enough for solving problems of this cyber-physical system.

Navigation system

For the orientation of the robot in the pipe, and its emergency extraction if necessary, to obtain the coordinates of its location on a digital map of the pipeline on the side of the operator.

The positioning system of the robot in the pipeline is implemented as a module of Autonomous navigation (MANG), which is mounted in the robot body. At its core, the MAN is built like a strapdown inertial navigation system (ins) that implements the dead reckoning of speed and its correction from a source external information. MAN consists of two channels - channel determine the speed and the current coordinates of the robot, and angle-measuring channel is required for passage of the bends of the pipeline.

The channel speed and the current coordinates are included: inertial navigation system, which has a triaxial accelerometer and three-axis gyroscope; onboard computer that implements the algorithms of MAN; an external source of information (synchronization), implemented through the communication system. In the azimuth channel is the same as a triaxial accelerometer, angular rate sensor (DOS) (Fig. 2).

To ensure high-precision positioning of the robot on a digital map of the pipeline information from these devices should be complexonate with other sources of navigational information such as mechanical pedometer.

When integrating inertial sensors included in the navigation system of the robot with the navigation sensors of other types system synchronization with an external source, other devices, the latter are used as external auxiliary information for the selection and evaluation algorithm of Kalman filtering systematic errors of inertial sensors and their subsequent correction by the open-loop or closed-loop circuit [6].

As an additional external source can be a mechanical pedometer motion of the robot or the means of the secondary radar, implemented by radio.

As a result, the accuracy of the navigation system of the robot is determined by the accuracy of the estimates of these errors and weakly depends on information contribution of the measurements of other sensors.

Functional diagram of the integrated processing is shown in Fig. 2. It is assumed that before a comprehensive treatment of current measurements are pre-processing, providing systematic input of amendments, independent from the measured parameters of the smoothing and compression of the results and bind them to a common time scale with the same pitch. It is also believed that previously carried out high-precision calibration of navigation sensors, allowing the processing to compensate for the offset and asymmetry of transmission of the sensitive axes of the sensors. In relation to this application problem the algorithm of complex processing of azimuth information solves the problem of the formation according to the DSU and module external synchronization the current Kalman estimate of the angles of orientation of the robot in the pipeline [5, 6].

The navigation system provides the accuracy of determining the location of the robot on a digital map of the pipeline not more than half of his true position.

Figure 2 – block diagram of the navigation system

Conclusion

The improvement of robots for diagnostics of gas pipelines is an important scientific and practical task that will improve inspection efficiency and safety of gas pipelines. The planned growth of conducting internal diagnostics of gas pipelines [7, 8]. The main causes of accidents involving gas leaks are corrosion damage of metal of the pipeline (over 50%), mechanical damage to the pipeline, defects and fatigue phenomenon in the metal and welded the elements of the pipeline. [9]. The wide use of robots for diagnostics of gas pipelines will significantly improve their reliability and to reduce the number of accidents.

1. Weisberg, P. M., Emlyn M. F. and others, "Universal diagnostic shell-flaw detector for monitoring of the pipeline". The patent for the invention 2111453.
2. Ignatiev M. B., Gerasimov G. M., Lipinski, A. J., Makin P. I. "Autonomous adaptive walking robot for diagnostics of pipelines," Information materials of the world exhibition Hannover Messe 2013, 8-12 April 2013.
3. Ignatiev M. B., Zharinov O. O., Gerasimov G. M., Lipinski J. A., Nenashev V. A., Makin P. I. "Autonomous adaptive walking robot for diagnostics of pipelines", invention patent No. 2571242, priority from 13.03.2014.
4. A. Betz "Wind-Energie und ihre Ausnutzung durch Windmühlen." Based & Ruprecht, Göttingen 1926, Ökobuch Verlag, Staufen 1994.-161 p.
5. Kuzovkov N. So, Salychev O. S. Inertial navigation and optimal filtering. – M.: Mechanical Engineering. 1982. – 216 p.
6. Ivanov D. S., et al. Calibration of the sensors to determine the orientation of small spacecraft // Preprint IPM im. M. V. Keldysh. 2010. No. 28.- 30 p.
7. The General scheme for gas industry development of Russia for the period up to 2030 – M., 2008.- 145 p.
8. The strategy of development of it industry in Russia for 2014-2020 and on prospect till 2025 – M., 2013.- 51p.
9. Shammazov A. M. and others "Bases of technical diagnostics of pipeline systems of oil and gas: the textbook for high schools"- Ufa, 2009.- 512 p.

М.Б. Игнатьев, А.В. Коршунов, Р.В. Клейменов, О.О. Жаринов, В.А. Ненашев, Я.А. Липинский, П.И. Макин

ПРОБЛЕМЫ РАЗРАБОТКИ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АВТОНОМНЫХ РОБОТОВ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ГАЗОПРОВОДОВ

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

A.V. Vasiliev

DEVELOPMENT AND STUDY OF THE COMPLETE COMPUTER MODEL OF SMALL-SIZED MOBILE ROBOT TRANSPORT SYSTEM WITH RECONFIGURABLE CHASSIS

Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics, Saint-Petersburg
andrey@rtc.ru

Abstract

The work is devoted to the design of small-sized transport systems for mobile mini-robots (MMR). The results of the structural analysis of the MMR transport system with a reconfigurable chassis are presented. Mathematical and computer models of all parts of the transport system have been developed along with a complete computer model of the transport system, which includes two subsystems: a locomotion subsystem and a subsystem of the chassis geometric configuration changing. A study of the transport system motion has been carried out on the computer model in two configurations (tracked and wheeled) with different angles of the surface and different weights of the payload. The corresponding experimental studies were carried out on the physical prototype of the MMR. Comparison of the results showed good convergence of the calculated and experimental data, which indicates the reliability of the developed computer models.

Key words: mobile robot; mobile mini-robot; transport system; reconfiguration; chassis; computer model; simulation

The work is devoted to the design of small-sized transport systems for mobile mini-robots (MMR).

The transport system of any mobile robot is a sequence of elements directly involved in the process of consecutively converting the energy of the on-board power source into the mechanical energy of motion. This process can be divided into three stages: distribution, conversion and energy consumption. The consumer is a chassis which is considered in interaction with the support base.

The main tasks to be performed during the MMR transport system development are:

1) analysis of technical requirements;
2) synthesis of the structural-kinematic scheme of the chassis;
3) parametric synthesis of the chassis;
4) determination of the drives and mechanical transmissions parameters; determination of the structure of the chassis;
5) analytical calculations and computer simulation of the transport system;
6) the accepted parameters and technical solutions refinement.

The calculation and simulation of the transport system in the basic modeling cases are one of the main parts of the development process. The purpose of this step is to evaluate the correctness of the decisions taken, analyze the loads acting on the components of the transport system, make assessment of its functionality and performance characteristics. The basis of such simulations is the developed mathematical and computer models, on the adequacy of which (i.e. the degree of approximation to a real physical object) the reliability of the obtained results depends.

Within the framework of the present work, the task was to develop approaches and build a complete computer model of the small-sized MMR transport system, the structural composition and scheme of which was determined earlier, to perform research and analysis of features, to test and evaluate the adequacy of models by experimental verification methods. The structural-kinematic scheme of the chassis of the transport system under study is shown in Fig.1 and includes two configurations: tracked and wheeled.

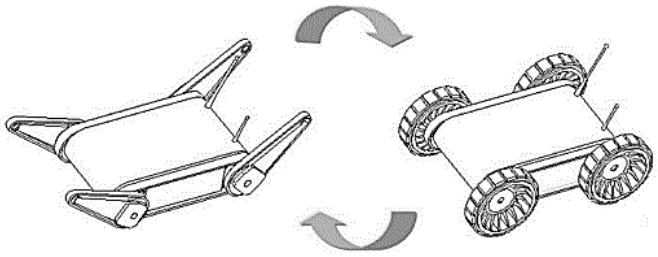


Figure 1 – The MMR chassis scheme

Mathematical and computer models of all parts of the MMR transport system have been developed, their experimental verification has been carried out, and a complete computer model of the transport system has been constructed. This model includes two subsystems: a locomotion subsystem and a subsystem of the chassis geometric configuration changing.

The computer model study of accelerated and uniform motion of the MMR transport system in two configurations along surfaces with different angles of inclination and with different masses of payloads have been carried out. Appropriate experimental studies have been carried out on the physical MMR prototype, which has geometric and mass-inertial characteristics identical with the computer model.

Comparison of the computer simulation results with the experimental data showed a close agreement between them, which indicates the reliability of the computer models developed.

А.В. Васильев

ПОСТРОЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛНОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ МАЛОГАБАРИТНОГО МОБИЛЬНОГО РОБОТА С РЕКОНФИГУРИРУЕМЫМ ШАССИ

ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург
andrey@rtc.ru

Аннотация

Работа посвящена вопросам проектирования малогабаритных транспортных систем мобильных мини-роботов (ММР). Приводятся результаты структурного анализа транспортной системы ММР с реконфигурируемым шасси. Построены математические и компьютерные модели всех звеньев, и разработана полная компьютерная модель транспортной системы, включающая две подсистемы: подсистему передвижения и подсистему изменения геометрической конфигурации шасси. Проведено исследование движения модели транспортной системы в двух конфигурациях: гусеничной и колёсной – при различных углах наклона поверхности и различных массах полезного груза. Проведены соответствующие экспериментальные исследования на макетном образце ММР. Сравнение результатов показало хорошую сходимость расчётных и экспериментальных данных, что позволяет говорить об адекватности разработанных компьютерных моделей.

Ключевые слова: мобильный робот; мобильный мини-робот; транспортная система; реконфигурация; шасси; компьютерная модель; моделирование

Введение

Мобильная робототехника – одно из наиболее активно развивающихся направлений экстремальной робототехники. Мобильные роботы (МР) предназначены для доставки в рабочую зону специального (технологического, манипуляционного) оборудования с целью выполнения функциональных задач на удалении от центра управления. Общая классификация МР приводится в работах [1, 2]. Любой МР может быть представлен в виде совокупности трёх основных частей: системы управления и двух исполнительных подсистем: транспортной и специальной [3].

Технические решения, принятые при создании транспортной системы во многом влияют как на конечный облик всего МР, так и на его функциональные возможности, способность к адаптации к условиям движения, энергозатраты на движение и пр. Обоснованность этих решений играет ключевую роль при создании МР. Особенно это актуально для роботов мини- и микроразмерностей [1, 2], к

транспортным системам которых предъявляются более высокие требования по проходимости в виду их небольших собственных размеров [4]. Актуальной задачей в настоящее время [5-8] является разработка универсальной платформы для мобильных мини-роботов (ММР) – роботов носимого класса массой до 15 кг [1, 2], предназначенных для решения разведывательных и ряда других задач. Особенности и назначение ММР описаны в [4-7, 9].

Настоящая работа относится к вопросам проектирования малогабаритных транспортных систем ММР и является продолжением работ [10-12].

Основные задачи, решаемые при проектировании транспортной системы ММР:

1) анализ предъявляемых технических требований [4, 9, 12];
2) синтез структурно-кинематической схемы шасси [12];
3) параметрический синтез шасси [12];
4) определение параметров приводов, механических передач, структуры ходовой части;
5) аналитические расчёты и компьютерное моделирование транспортной системы;
6) уточнение принятых параметров и технических решений.

Задачи исследования

Одной из основных частей проектных работ является проведение расчётов и моделирование транспортной системы на основных расчётных режимах. Целью этого этапа является оценка правильности принятых решений, анализ нагрузок, действующих на компоненты транспортной системы, оценка её функциональных возможностей и эксплуатационных характеристик. Основа таких расчётов – разработанные математические и компьютерные модели, от адекватности которых, т.е. степени приближения к реальному физическому объекту, зависит достоверность полученных результатов.

В рамках настоящей работы была поставлена задача разработать подходы и построить полную компьютерную модель малогабаритной транспортной системы ММР, провести исследование и анализ её особенностей, проверить и оценить адекватность моделей методами экспериментальной проверки.

На рис. 1 показана определённая ранее [11, 12] структурно-кинематическая схема шасси исследуемой транспортной системы. Она включает две конфигурации: гусеничную 6Г2А[9] и колёсную 4К2Г.

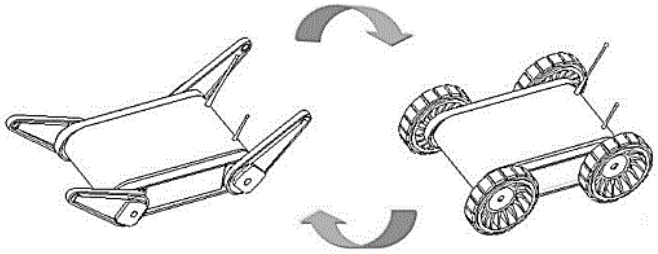


Рисунок 1 – Схема шасси ММР

Структура транспортной системы

Транспортная система любого МР представляет собой совокупность элементов, непосредственно участвующих в процессе последовательного преобразования энергии бортового источника в механическую энергию движения [13]. Этот процесс может быть разбит на три стадии: распределение, преобразование и потребление энергии. В качестве потребителя выступает ходовая часть, рассматриваемая во взаимодействии с опорным основанием.

Структурная схема рассматриваемой транспортной системы показана на рис. 2.

[9] Буквенно-цифровые обозначения схем шасси приводятся в соответствии с [10,11].

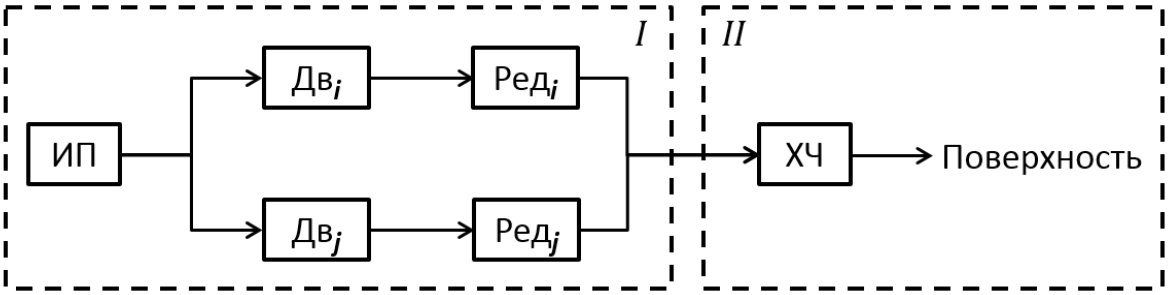


Рисунок 2 – Структурная схема транспортной системы ММР:
ИП – источник питания; Дв – двигатель; Ред – редукторы (механические передачи);
ХЧ - ходовая часть; I –приводная подсистема; II – исполнительная подсистема

Особенностью приведённой схемы является разветвление её электромеханической системы на две относительно независимые параллельные части: i тяговых приводов (ТП) и j приводов механизмов изменения геометрии (МИГ). Для рассматриваемой примера транспортной системы.

$$i = 2; \quad j = 2 \tag{1}$$

Подсистема управления исполнительными приводами транспортной системы условно отделена от неё с целью упрощения анализа последней. В этом случае управляющие воздействия (уровни питающих напряжений на двигателях) считаются известными и рассматриваются в качестве исходных данных анализа [13], а двигатели приводов считаются подсоединёнными непосредственно к источнику питания (АКБ).

Каждый из приводов представлен электродвигателем и совокупностью механических передач, состав которых определяется, в том числе, из конструктивно-компоновочных решений всего ММР. Важно отметить, что, учитывая небольшие размеры мини-робота, компоновка всех его частей в целом способна существенно повлиять на состав компонентов транспортной системы [14] и должна проводиться уже на первых этапах формирования её технического облика с целью проверки принципиальной реализуемости разработанных схемных решений с учётом определённых геометрических параметров.

Компьютерная модель транспортной системы ММР

Исходя из представления о транспортной системе ММР как о последовательной цепи обобщённых звеньев [13] в соответствии с рис. 2 разработана её компьютерная модель, включающая две основные подсистемы: 1) «источник питания – двигатели - редукторы»; 2) «ходовая часть - поверхность».

Первая из них условно относится к приводной части, характеризуемой единственной степенью подвижности для каждого из i-х или j-х приводов, вторая – в терминах теории автоматического управления представляет собой объект управления [15] или исполнительную подсистему, характеризуемую сложным взаимодействием с внешней средой.

На рис. 3 и 4 представлена общая блок-схема компьютерной модели приводной части транспортной системы ММР. Модель включает в себя следующие блоки:

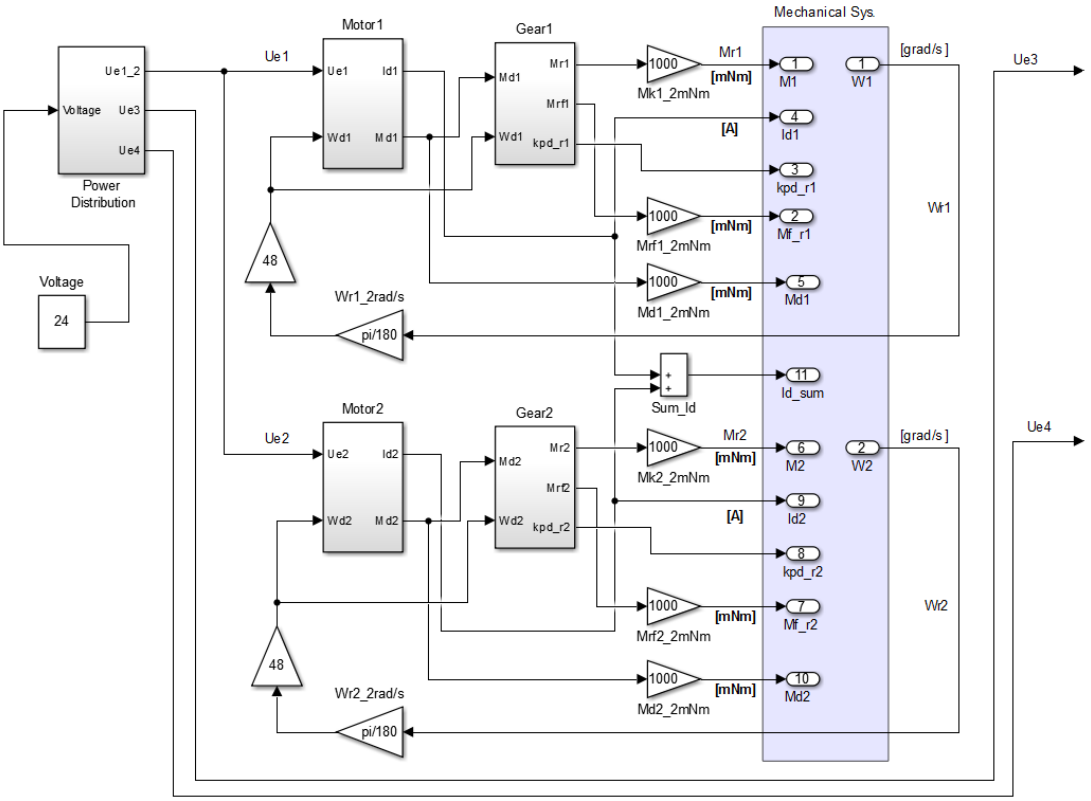


Рисунок 3 – Компьютерная модель приводной части транспортной системы ММР

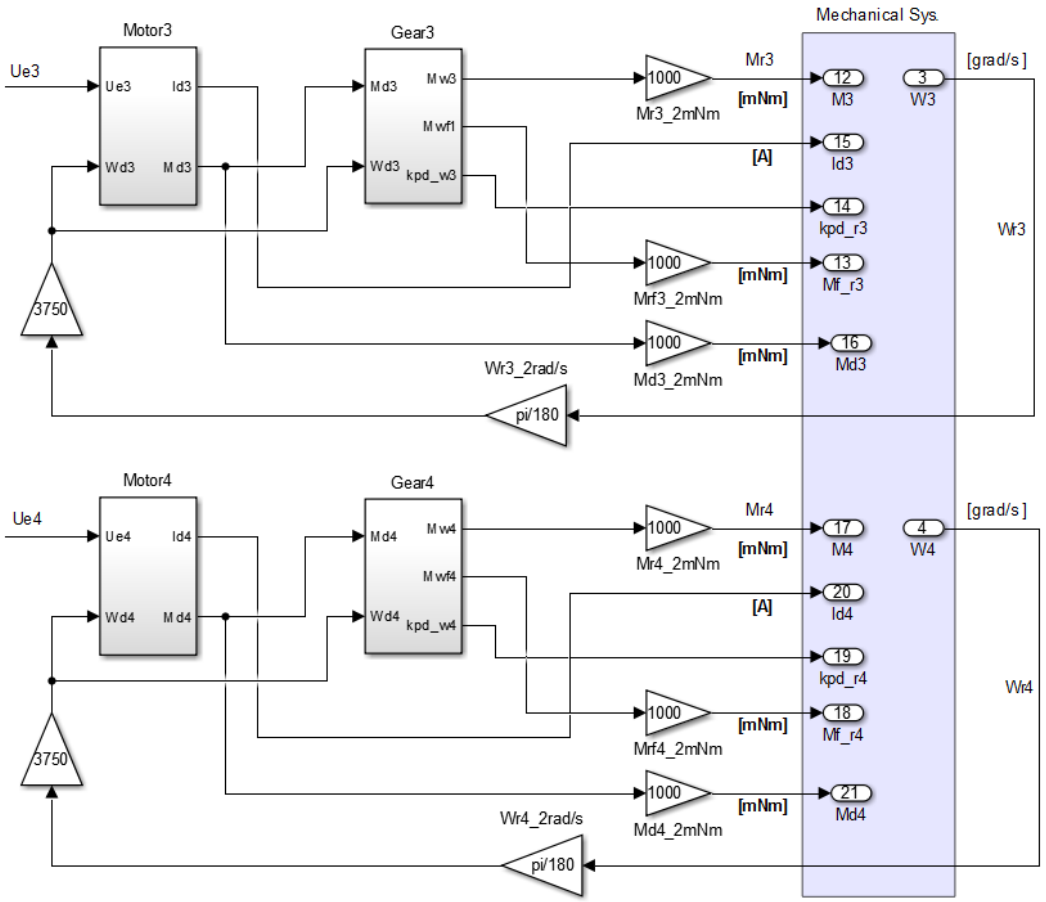


Рисунок 4 – Компьютерная модель приводной части транспортной системы ММР (продолжение)

– блок «Voltage» устанавливает задающее воздействие (напряжение питания) на приводы;

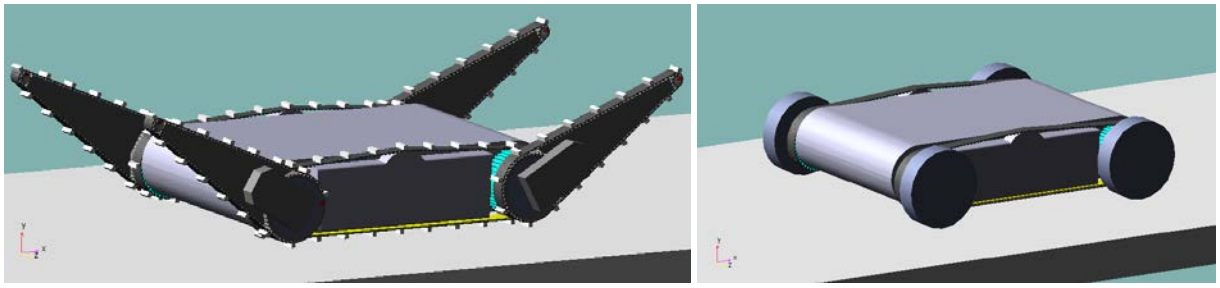
– блок «Power Distribution» имитирует работу простейшего распределительного устройства, подключающего к питанию тот или иной привод в заданный момент времени;

– блоки «Motor» представляют собой модели электродвигателей ТП («Motor1» и «Motor2») и приводов МИГ («Motor3» и «Motor4»). Эти модели идентичны по структуре, но различаются конструктивными параметрами используемых электродвигателей;

– блоки «Gear» моделируют редукторную часть ТП («Gear1» и «Gear2») и приводов МИГ («Gear3» и «Gear4»);

– блоки «Mechanical Sys.» представляет собой подсистему входных-выходных параметров, используемых для связи с моделью исполнительной части транспортной системы.

На рис. 5 представлена имитационная компьютерная модель исполнительной части транспортной системы ММР. Модель включает в себя следующие компоненты: корпус; две зубчатые ременные передачи с грунтозацепами, имитирующие основные гусеницы ММР; четыре рычага; четыре зубчатые ременные передачи с грунтозацепами, имитирующие дополнительные гусеницы ММР в конфигурации 6Г2А и четыре колеса, играющие роль опорных элементов в конфигурации 4К2Г.



а б

Рисунок 5 – Компьютерная модель транспортной системы ММР:
а – в гусеничной конфигурации 6Г2А; б – в колёсной конфигурации 4К2Г

Геометрические размеры и соотношения между компонентами модели соответствуют параметрам, определённым ранее [12]. Массоинерционные параметры составных частей модели заданы по результатам предварительной конструкторской проработки в среде CAD-моделирования.

Исследование движения модели транспортной системы ММР

Целью моделирования является исследование процесса разгона транспортной системы при движении по наклонной поверхности, определение действующих величин нагрузок на её элементы, затрат энергии на движение, а также определение характера влияния на эти величины текущего значения угла наклона опорной поверхности и веса робота с учётом полезного груза, т.е. оценка нагрузочной способности транспортной системы.

Для проведения таких исследований достаточно рассмотреть случай прямолинейного движения ММР по поверхностям с различными углами наклона [13]. Для этого на ТП обоих бортов устанавливаются идентичные задающие воздействия в виде одинаковых напряжений питания электродвигателей.

Универсальной характеристикой энергетических затрат приводов является суммарный потребляемый ток электродвигателей $I_{i\Sigma}$. На рис.6 показаны характерные графики суммарного тока для двух конфигураций транспортной системы – шестигусеничной 6Г2А и колёсной 4К2Г. Данный графики получены для случая движения транспортной системы по горизонтальной поверхности при напряжении питания электродвигателей 33 В. Графики, полученные в ходе моделирования при других расчётных случаях (другие напряжения, различные углы наклона поверхности, наличие полезного груза), имеют схожий вид.

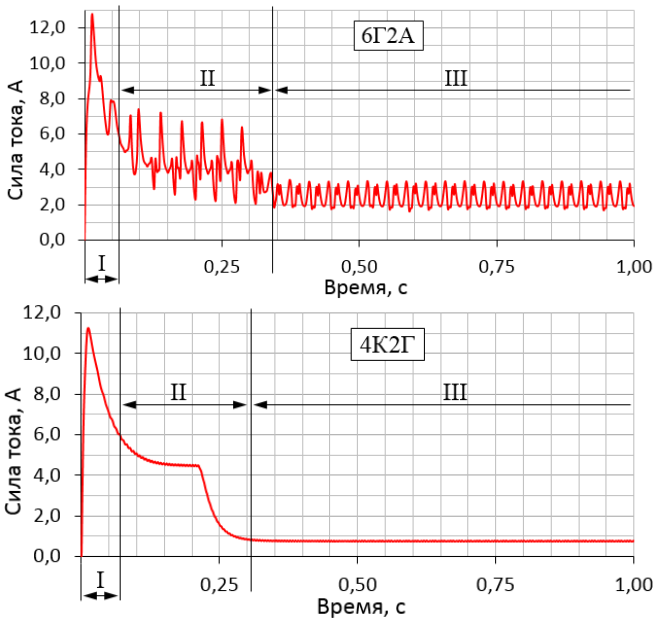


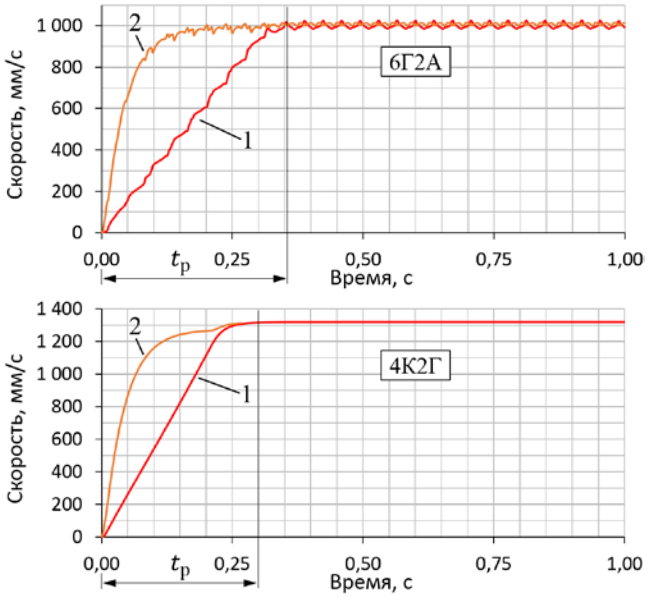
Рисунок 6 – Характерные графики суммарного тока в приводах

На графиках хорошо различимы три зоны, характеризующие следующие этапы движения: I – трогание; II – разгон с буксованием; III – равномерное движение. О наличии буксования говорит повышенное потребление в зоне II, т.е. наличие дополнительных потерь энергии, а также сравнение графиков реальной (действительной) скорости движения робота V_x и теоретической скорости $V_{x\,teor}$, определяемой по скоростям вращения колёс в соответствии с формулой

$$V_{x\,teor} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \dot{\varphi}_{\text{к}i}}{n}\, r_{\text{к}}\,, \qquad (2)$$

где $\dot{\varphi}_{\text{к}i}$ – угловая скорость колеса i-го ТП, $r_{\text{к}}$ – радиус качения, n – число ТП.

Сравнение графиков V_x и $V_{x\,teor}$, полученных для тех же расчётных случаев, что и графики на рис.6, представлено на рис.7.



1 – V_x; 2 – $V_{x\,teor}$; $t_{\text{р}}$ – время разгона

Рисунок 7 – Характерные графики теоретической и действительной скоростей ММР

Графики $I_{i\Sigma}$ на этапе равномерного движения, характеризуются значительными колебаниями, особенно сильно выраженными для гусеничной конфигурации 6Г2А.

Анализ результатов моделирования для схемы 6Г2А показывает, что эти колебания вызваны неравномерностью движения гусениц, а их период точно согласуется с шагом S расположения грунтозацепов и определяется формулой

$$T_{s_i} = \frac{S}{\dot{\varphi}_{\text{к}i} r_{\text{к}}} \ . \qquad (3)$$

Для схемы 4К2Г формула (3) также справедлива, если под S в ней понимать шаг расположения рабочих зубьев ремня.

Причина более значительных колебаний для конфигурации 6Г2А заключается в характере взаимодействия движителя с поверхностью. Картина этого взаимодействия различна для гусеничной и колёсной схем. Для схемы 4К2Г взаимодействие движителей с поверхностью происходит через четыре опорные точки, а основные гусеницы играют роль лишь передаточных механизмов, не нагруженных нормальными реакциями. Для схемы 6Г2А каждая гусеница взаимодействует с поверхностью через грунтозацепы, передавая далее эти нагрузки на передний и задний шкивы и нижние направляющие. При этом, как показывает совместный анализ видеозаписи движения и графиков, полученных в ходе моделирования, пики колебаний тока приходятся на моменты ударов грунтозацепов, входящих в данный момент в зацепление с поверхностью. С этим же связаны и колебания скоростей колёс и линейной скорости робота. Однако, в результате оценки установлено, что амплитуда этих колебаний не превышают 2 %.

Экспериментальные исследования

Экспериментальные исследования проводились на макете ММР с геометрическими и массоинерционными параметрами, соответствующим разработанной компьютерной модели. Задавалось движение транспортной системы ММР по тестовой поверхности с известными экспериментально определёнными характеристиками при различных значениях напряжения питания. Дополнительная нагрузка на транспортную систему создавалась путём изменения угла наклона поверхности и установки на ММР грузов различной массы. В ходе экспериментов измерялись скорости вращения электродвигателей ТП, суммарный потребляемый ток, линейная скорость движения макета. Полученные в ходе экспериментов результаты показали сходимость в пределах 5 % с расчётными данными полученными при моделировании. Это позволяет говорить о достаточно точном соответствии разработанных моделей экспериментальному образцу.

Заключение

Разработаны математические и компьютерные модели всех звеньев транспортной системы ММР с реконфигурируемым шасси, проведена их экспериментальная апробация и построена полная модель транспортной системы, включающая две подсистемы: подсистему передвижения и подсистему изменения геометрической конфигурации шасси.

Проведено исследование режимов разгона и равномерного движения транспортной системы ММР по поверхностям с различными углами наклона и с полезными грузами различной массы. Проведены экспериментальные исследования. Сравнение результатов расчётов с экспериментальными данными показало близкое их совпадение, что позволяет судить об адекватности разработанных моделей.

1. Васильев А.В. Обобщённая классификация мобильных роботов // Экстремальная робототехника: Тр. Междунар. науч-техн. конф. – СПб.: Политехника-сервис, 2014. – С.41-46.
2. 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
3. Батанов А.Ф., Грицынин С.П., Муркин С.В. Робототехнические комплексы для обеспечения специальных операций // Специальная техника. – 1999. – №6. – С. 10-17.
4. Васильев А.В. Реконфигурируемая транспортная платформа для малогабаритных мобильных роботов // Робототехника и техническая кибернетика. – 2014. – №2(3). – С.67-71. – ISSN 2310-5305.
5. Рубцов И.В. Вопросы состояния и перспективы развития отечественной наземной робототехники военного и специального назначения // Известия ЮФУ. Технические науки. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2013. – №3 (140). – С.14-21.
6. Лохин В.М., Манько С.В., Хованов Д.Г. Разработка требований к робототехническим комплексам военного назначения, применяемым при ведении боевых действий в городских условиях //

Перспективные системы и задачи управления: Мат. Седьмой всеросс. науч.-практ. конф. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2012. – С.6-11.
7. Обоснование семейства боевых и обеспечивающих роботов для боя в городе / И. Б. Шеремет, Н.А. Рудианов, А.В. Рябов, В.С. Хрущев, В.И. Комченков // Известия ЮФУ. Технические науки. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2012. – №3 (128). – С.37-41.
8. Проблемы роботизации ВВТ в части наземной составляющей / В. Б. Кудряшов, В.С. Лапшов, В.П. Носков, И.В. Рубцов // Известия ЮФУ. Технические науки. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2014. – №3 (152). – С.42-57.
9. Васильев А.В. Мобильные мини-роботы разведки: текущее состояние, характерные черты и общие тенденции развития // Избранные тр. Всеросс. науч.-практ. конф. «Перспективные системы и задачи управления» (2005-2014 гг.): в 3-х т. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2015. – Т.II. – С.38-42.
10. Васильев А.В. Принципы построения и классификация шасси мобильных роботов наземного применения и планетоходов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2013. – №1 (164). – С.124-131.
11. Васильев А.В. Исследование и классификация структурно-кинематических схем шасси мобильных роботов // Перспективные системы и задачи управления: Мат. Девятой всеросс. науч.-практ. конф. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2014. – С.115-128.
12. Васильев А.В. Методика синтеза структурно-кинематических схем шасси малогабаритных мобильных роботов // Перспективные системы и задачи управления: Мат. Десятой всеросс. науч.-практ. конф.: в 2-х т. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2015. – Т.II. – С.146-157.
13. Динамика планетохода / Е.В. Авотин, И.С. Болховитинов, А.Л. Кемурджиан, М.И. Маленков, Ф.П. Шпак; под ред. Б.Н. Петрова, А.Л. Кемурджиана. – М.: Наука, 1979. – 440 с.
14. Конструктивные особенности размещения приводов гусеничных платформ с изменяемой геометрией шасси / А.Ю. Седов, И.Б. Прямицын, А.Л. Коротков и др. // Экстремальная робототехника: Тр. Междунар. науч-техн. конф. – СПб.: ООО «АП4Принт», 2016. – С.393-395.
15. Градовцев А.А. Методика построения полной компьютерной динамической модели робототехнической системы // Актуальные проблемы защиты и безопасности: Тр. седьмой Всеросс. науч.-практ. конф. – СПб.: НПО Специальных материалов, 2004. – Т.4: Экстремальная робототехника. – С. 121-126.

S.Kh. Zabikhifar, A.S. Yuschenko

ADAPTIVE NEURAL NETWORK CONTROL SYSTEM OF THE MANIPULATOR

Bauman Moscow State Technical University

Abstract

The current research has put forward a new stable adaptive neural network control scheme for a robot manipulator. Due to the application of the online learning algorithm and intelligent variable approach, the robot can be controlled in different conditions well, and eliminate the chattering in the steady-state mode. As a robust integrated controller, an Intelligent Adaptive Neural Network Control (IANNC) system has been designed for a multi-input and multi-output (MIMO) system. The learning algorithms of the IANNC has been obtained through the conduction of the direct Lyapunov stability method. The Adaptive Neural Network Controller (ANNC) has been developed to apply a position controller in SCARA robot. The results of experimental works are given to highlight the performances of the proposed control scheme. Fewer setting parameters, adaptive algorithm, and efficient control input signals are key advantages of the proposed controller.

Keywords: adaptive neural network, robot manipulator, SCARA, on-line learning, chatter

С.Х. Забихифар, А.С.Ющенко

АДАПТИВНАЯ НЕЙРОСЕТЕВАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ МАНИПУЛЯТОРОМ

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

Аннотация

Предлагается новая адаптивная система управления манипуляционным роботом с помощью нейронной сети. Благодаря применению алгоритма онлайн-обучения и работе в скользящем режиме обеспечивается управление роботом в заранее не определенных условиях. Разработанная система, названная как Intelligent Adaptive Neural Network Control (IANNC) может быть использована для широкого класса систем управления с несколькими входами и с несколькими выходами (MIMO). Алгоритмы обучения IANNC были получены с помощью процедуры прямого метода устойчивости Ляпунова. Адаптивный нейронный сетевой управления (ANNC) был применен в задаче управления положением робота типа SCARA. Приведенные результаты экспериментов подтверждают эффективность предложенного метода

Ключевые слова: адаптивная нейронная сеть, робот- манипулятор, SCARA, он-лайн обучение, чаттер

Введение

Одна из проблем управления роботами-манипуляторами в ряде областей их применения связана со сложностью математической модели динамики. Это связано с нелинейным характером динамики, её неполным описанием, существенным взаимовлиянием каналов управления. В большинстве промышленных приложений применяются PD и PID-регуляторы, использование которых может быть неэффективным в силу перечисленных факторов [1], [2]. В случае линеаризации уравнений движения не учитывается также существенное изменение параметров математической модели в процессе движения [3]. Значительный интерес представляет применение скользящих режимов в комбинации с нейронной сетью RBF, что позволяет управлять манипулятором при неполной информации о его математической модели [4]. Применение нейронных сетей позволяет реализовать адаптивное управление манипуляционным роботом с предварительным обучением сети для данного робота [5]. Таким образом, обеспечивается решение задачи идентификации математической модели динамики робота, в том числе, при взаимодействии робота с внешней средой.

Данная работа посвящена развитию упомянутых методов, сочетающих применение нейронных сетей и скользящих режимов при управлении манипуляционными роботами со сложной динамикой. Разработан способ адаптивного управления с помощью нейросетевого регулятора, позволяющий одновременно управлять двумя исполнительными механизмами. Применение метода показано на примере робота с двумя степенями подвижности, однако метод может быть аналогично реализован и

при управлении манипуляторами с большим числом степеней подвижности. Предварительные результаты исследования показывают, что предлагаемый подход позволяет обеспечить устойчивое и достаточно точное управление манипуляторами при движении по заданной траектории, в том числе при наличии внешних возмущений

Постановка задачи

Динамика робота-манипулятора с жесткими звеньями в форме Эйлера-Лагранжа записывается как

$$M(q)\ddot{q} + C(q,\dot{q}) + G(q) + \tau_d = \tau\,, \tag{1}$$

где $M(q)$ симметричная положительно определенная инерционная матрица, $C(q,\dot{q})$ это вектор центростремительных крутящих моментов и крутящих моментов Кориолиса, $G(q)$ вектор гравитационных моментов, $\tau_d(t)$ представляет собой вектор возмущений, которые предполагаются ограниченными, а вектор τ – вектор активных моментов в степенях подвижности . Предполагается также, что трение пренебрежимо мало [7].

В частности, для манипулятора с двумя степенями подвижности, для которого ниже выполняется моделирование предложенного алгоритма, (Рис.1).

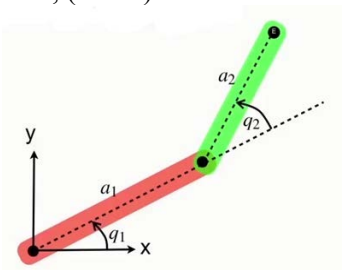


Рисунок 1 – Упрощенная модель двухзвенного манипулятора

$$M(q) = \begin{bmatrix} \alpha + \beta + 2\eta\cos q_2 & \beta + \eta\cos q_2 \\ \beta + \eta\cos q_2 & \beta \end{bmatrix},$$

$$C(q,\dot{q}) = \begin{bmatrix} -\eta(2\dot{q}_1\dot{q}_2 + \dot{q}_2^2)\sin q_2 \\ \eta\dot{q}_1^2\sin q_2 \end{bmatrix},\ G(q) = \begin{bmatrix} \alpha e_1\cos q_1 + \eta e_1\cos(q_1+q_2) \\ \eta e_1\cos(q_1+q_2) \end{bmatrix},\ \tau = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix}$$

где $\alpha = (m_1+m_2)a_1^2, \beta = m_2a_2^2, \eta = m_2a_1a_2, e_1 = g/a_1$,

Рассматривается задача движения схвата манипулятора по заданной траектории, которая определяется в пностранстве обобщенных координат как $q_d(t)$. Для того, чтобы обеспечить движение манипулятора по поверхности скольжения в цепи ошибки вводится линейный фильтр [3,4]. Определим текущую ошибку $e(t)$ и ошибку после преобразования линейным фильтром $r(t)$ как

$$\begin{aligned} e(t) &= q_d(t) - q(t) \\ r &= \dot{e} + \lambda(t)e \end{aligned} \tag{2}$$

где $\lambda > 0$ - положительный параметр. Можно показать, с учетом уравнений (1) и (2), что сходимость r к нулю влечет сходимость ошибки слежения за траекторией e и ее производной к нулю [8]. Поэтому задача управления теперь заключается в синтезе такого закона управления, который обеспечивает сходимость преобразованной ошибки r к нулю.

Уравнение динамики манипулятора в терминах преобразованной ошибки может быть записано как:

$$M\dot{r} = -Cr + f(x) + \tau_d - \tau \tag{3}$$

где неизвестная функциця $f(x)$, определяемая динамикой манипулятора, записывается как

$$f(x) = M(q)(\ddot{q}_d + \lambda\dot{e}) + C(q,\dot{q})(\dot{q}_d + \lambda e) + G(q) \tag{4}$$

Закон управления должен предусматривать идентификацию этой функции и обеспечивать компенсацию отклонений при действии внешних возмущений. При этом адаптивный нейросетевой регулятор должен обеспечить асимптотическую устойчивость системы.

Структура контроллера

В соответсвии с универсальной аппроксимационной теоремой, нейронные сети (НС) типа SHL (Single Hidden Layer) могут аппроксимировать нелинейные, непрерывные функции [1]. Согласно этому свойству существует двухслойная НС, такая, что

$$f(x) = W^T \sigma(V^T x) + \varepsilon \tag{5}$$

где матрицы V, W являются оценками матриц весовых коэффицитентов, x является входным вектором нейронной сети, σ является сигмоидной активационной функцией, а погрешность аппроксимации ε ограничена на компакте: $\|\varepsilon\| < \varepsilon_N$.

В рассматриваемом случае текущее значение управляющего сигнала выберем как

$$\tau = \hat{W}^T \sigma(\hat{V}^T x) + k_v r + \upsilon \tag{7}$$

где $\hat{V}, \hat{W}$ являются матрицами входных и выходных весов нейронной сети соответственно, которые должны быть определены с помощью алгоритмов настройки. Заметим, что $\hat{V}, \hat{W}$ являются оценками идеальных значений весовых матриц. Компоненты вектора x: $x_i = [e_i, \dot{e}_i, \theta_{id}, \dot{\theta}_{id}, \ddot{\theta}_{id}]$ является входным вектором каждого нейрона и $e_i = \theta_{id} - \theta_i$, $i = 1,2$; k_v, k_s являются константами и $\upsilon = -k_s\, sat(r/\varphi)$ представляет собой функцию, которая обеспечивает устойчивость; она будет подробно описана ниже. Структура системы управления показана на Рис.2.

Примем предположение относительно матриц весовых коэффициентов:

$$\|W\| \le W_m, \|V\| \le V_m, \|\varphi\| < \delta,$$

где W_m, V_m, δ - неизвестные положительные константы и обозначим ошибки оценки весовых матриц как:

$$\tilde{V} = V - \hat{V}\ \tilde{W} = W - \hat{W}$$

Для настройки весовых коэффициентов целесообразно применить метод e-модификации, который обычно используется ошибки аппроксимации НС [10]. При этом законы настройки весовых коэффициентов определяются согласно следующим дифференциальным уравнениям [7]:

$$\dot{\hat{W}} = F_w(\hat{\sigma} r^T - k\|r\|\hat{W})$$
$$\dot{\hat{V}} = F_v(x r^T \hat{W}^T \hat{\sigma}' - k\|r\|\hat{V}) \tag{8}$$

для любых положительно определенных матриц F_W, F_V; k - положительная константа. Показано, что ошибка $r(t)$ в этом случае приближается к нулю с течением времени, а матрицы оценок весовых коэффициентов $\hat{V}, \hat{W}$ ограничены.

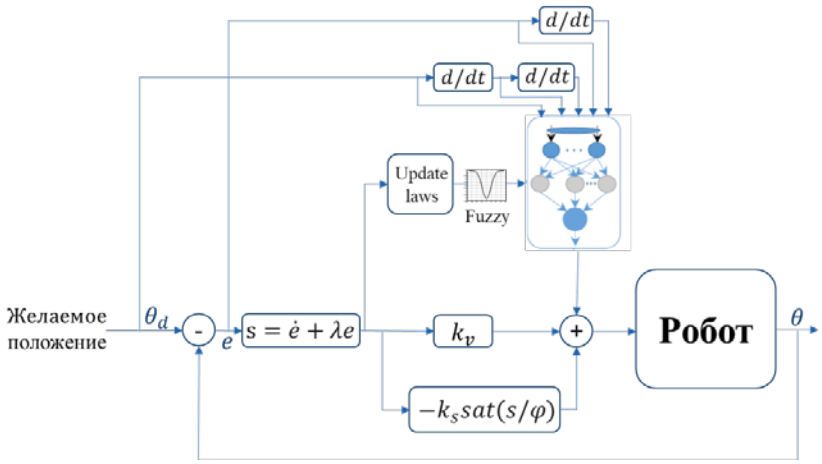


Рисунок 2 – Структурная схема системы управления

Как отмечалось выше, особенностью применения данного похода является возможность возникновения высокочастотных колебаний в окрестности поверхности скольжения (феномен chatter). Предлагается новый подход для устранения этого явления. Положим, что уравнение для определения матрицы весовых коэффициентов $\dot{\hat{W}}$ определяется как:

$$\dot{\hat{W}} = g(e)(\hat{\sigma} r^T - k\|r\|\hat{W}), \tag{9}$$

где e - погрешность положения, а функция gопределена с помощью функции Гаусса (Рис.3):

$$g(x) = [-0.455 \times (e^{\frac{-0.5x^2}{50}})] + 1.04 \tag{10}$$

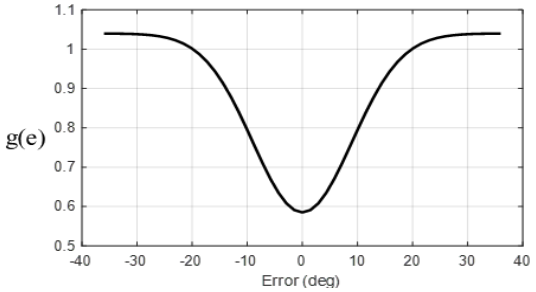


Рисунок 3 – Гауссовский функциональный подход к динамическим изменениям коэффициента F_w

Таким образом функция Гаусса использована для изменения коэффициента F_W в (8) в соответствии с погрешностью положения. Коэффициенты, входящие в определение функции g (x), были выбраны для того, чтобы коэффициенты принимали значения 0,6 и 1,05, которые являются минимальным и максимальным коэффициентами в соответствии с ошибкой положения (Рис.3).

Результаты эксперимента

Чтобы показать эффективность предложенного способа управления, проводились экспериментальные исследования при управлении положением робота SCARA. Параметры робота приведены в табл.1.

Контроллер был реализован на базе Raspberry Pi3 с частотой обмена в контуре управления 50 Гц. Первый эксперимент - это реакция на ступенчатое воздействие (не полностью идеальное), как показано на Рис. 4 и 5. Первоначально первое звено перемещается, а второе - нет. Показано, что после периода обучения обеспечивается отработка внешних возмущений. Затем начинает двигаться второе звено, а первое останавливается. После этого оба звена перемещаются для применения динамических возмущениях на каждой руке.

Управление положением робота при отработке гармонического воздействия показано на Рис.6 и 7. Частота и амплитуда воздействия изменялись во время теста, чтобы проверить способность системы к отработке изменяющегося входного воздействия. отслеживания и адаптивный отклик управления в разных ситуациях. Ошибки отслеживания положения первого и второго звеньев робота показаны на Рис.8.

Таблица 1. Параметры робота SCARA

первое звено		**второе звено**	
характеристик	Value	характеристик	Value
Вес звена	0.18 *kg*	Вес звена	0.18 *kg*
длина звена	0.125 *m*	длина звена	0.125 *m*
Инерция двигателя и шестерни	*11.9* $g.cm^2$	Инерция двигателя и шестерни	*13* $g.cm^2$

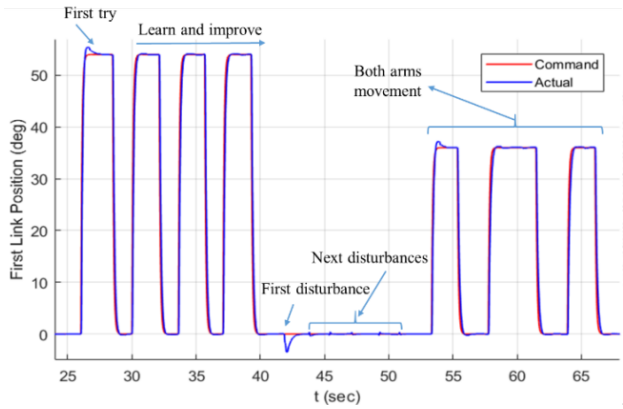


Рис. 4. Управление первым звеном

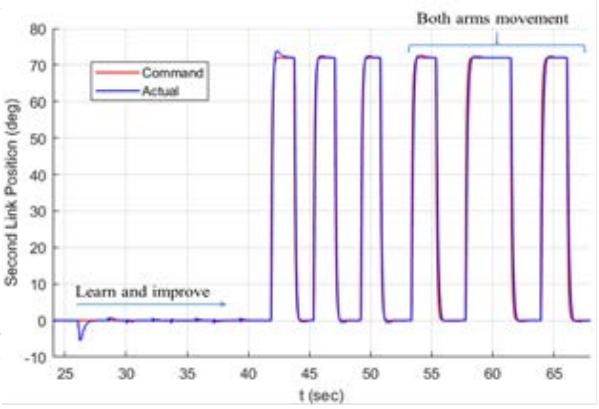


Рис.5 Управление вторым звеном

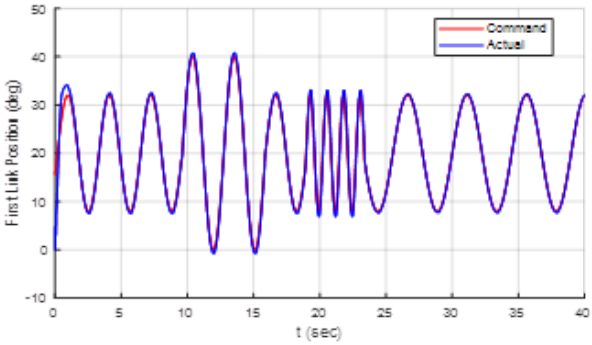


Рисунок 6 – Отработка гармонического сигнала первым звеном

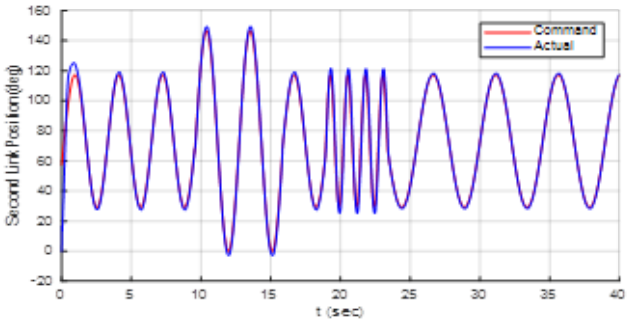


Рисунок 7 – Отработка гармонического сигнала вторым звеном

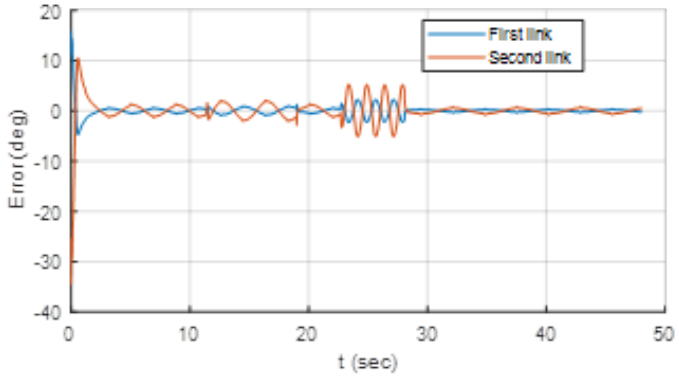


Рисунок 8 – Ошибки положения звеньев при отработке гармонического воздействия

Из эксперимента можно сделать вывод, что благодаря алгоритму онлайн-обучения с адаптивными правилами предложенный алгоритм управления может оценивать динамику робота во время движения, а также компенсировать внешние возмущения. Экспериментальные результаты доказывают также, что предлагаемый подход достаточно устойчив к динамическим возмущениям, обусловленные взаимовлиянием динамики звеньев. При этом система управления учится на основании предыдущего опыта и улучшает свою работу. Предложенный способ компенсации высокочастотных колебаний позволяет практически полностью избежать этого явления.

Представляет интерес сравнить предложенный алгоритм (IANNC) с известным алгоритмом ANNC с фиксированными величинами коэффициентов адаптации. Оба метода были экспериментально реализованы и сравнение показало, что новый метод улучшает точность выполнения операции. Сравнение ошибок обоих методов приведено на Рис.9. На рис.10 показано сравнение относительно дисперсии ошибки, которая вычислялась по формуле

$$Var(x) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \mu)^2 \qquad (11)$$

где μ - желаемое значение, n количество данных и x -входная переменная. Как показано на Рис.10, дисперсия ошибка по положению была уменьшена до 34.16% с использованием предложенного алгоритма IANNC, хотя высокочастотные колебания несколько увеличились.

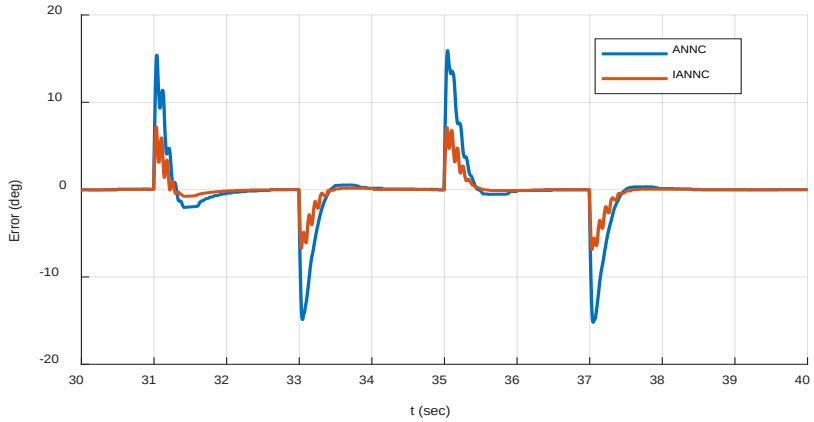


Рисунок 9 – Сравнение ошибок методов ANNC и IANNC по характеру изменения сигнала ошибки

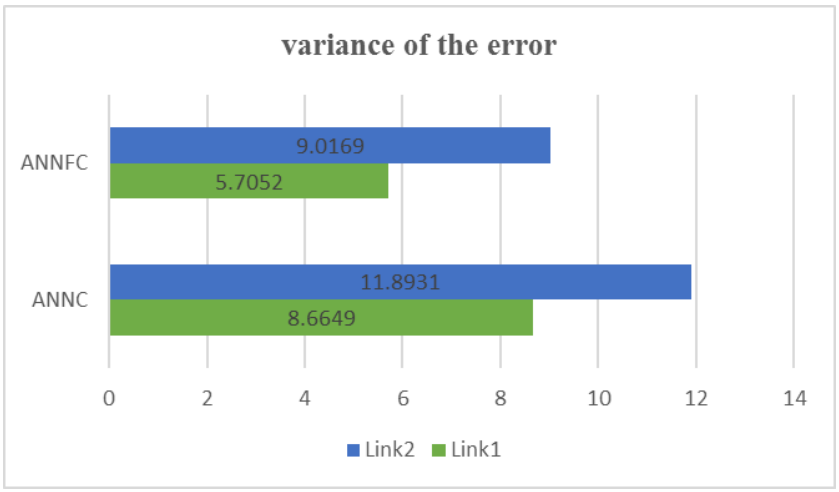


Рисунок 10 – Сравнение ошибок методов ANNC и IANNC по дисперсии ошибки

Заключение

Был предложен новый контроллер положения с использованием адаптивной нейронной сети для управления движением робота-манипулятора. Из-за сложности динамической модели схема управления, основанная на применении адаптивной нейронной сети была разработана и оптимизирована в форме интегрированного контроллера для всех приводов робота, а новый алгоритм IANNC был позволил устранить высокочастотные колебания (chatter) и повысил точность процесса отработки заданной траектории без использования предварительной информации о параметрах робота. Алгоритм настройки весовых коэффициентов нейросети был получен с учетом универсального свойства аппроксимации нейронных сетей, в то время как законы адаптации весовых коэффициентов были существенно модифицированы. Экспериментальные результаты показали эффективность предложенного закона управления для робота SCARA. Предложенный подход является универсальным и может быть применен для манипуляционных роботов с другой кинематической схемой и большим числом степеней подвижности.

1. J. Alvarez-Ramirez, I. Cervantes, and R. Kelly, “PID regulation of robot manipulators: stability and performance,” Syst. Control Lett., vol. 41, no. 2, pp. 73–83, Oct. 2000.

2. I. Cervantes and J. Alvarez-Ramirez, “On the PID tracking control of robot manipulators,” Syst. Control Lett., vol. 42, no. 1, pp. 37–46, Jan. 2001.
3. A. Farrage, B. Sharkawy, A. S. Ali, M. S. Soliman, and H. A. Mohamed, “Trajectory Tracking of SCARA robot with an Adaptive Neuro-Fuzzy Control scheme,” Int. J. Eng. Res., vol. 3, no. 5, pp. 512–520, 2015.
4. F. Wang, Z. Chao, L. Huang, H. Li, and C. Zhang, “Trajectory tracking control of robot manipulator based on RBF neural network and fuzzy sliding mode,” Cluster Comput., pp. 1–11, Dec. 2017.
5. W. He and Y. Dong, “Adaptive Fuzzy Neural Network Control for a Constrained Robot Using Impedance Learning,” IEEE Trans. Neural Networks Learn. Syst., pp. 1–13, 2017.
6. H. Chaudhary, V. Panwar, R. Prasad, and N. Sukavanam, “Adaptive neuro-fuzzy based hybrid force/position control for an industrial robot manipulator,” J. Intell. Manuf., vol. 27, no. 6, pp. 1299–1308, 2016.
7. F. L. Lewis, S. Jaganathan, and A. Yesildirek, Neural Network Control of Robot Manipulators and Nonlinear Systems. 1999.
8. E. Slotin, Applied nonlinear control. New Jersey: Prentice Hall, 1991.
9. N. R. Hana Boudjedir, Fouad Yacef, Omar Bouhali, “Dual Neural Network for Adaptive Sliding Mode Control of Quadrotor Helicopter Stabilization,” Int. J. Inf. Sci. Tech., vol. 2, no. 4, pp. 101–115, 2012.
10. S. S. (Shuzhi S. . Ge, C. C. Hang, T. H. Lee, and T. Zhang, Stable Adaptive Neural Network Control. Springer US, 2002.
11. J. Craig, introduction to robotics mechanics and control. Addison-Wesley, 2006.
12. D. Tsetserukou, R. Tadakuma, H. Kajimoto, and S. Tachi, “Optical torque sensors for implementation of local impedance control of the arm of humanoid robot,” in Proceedings 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006., pp. 1674–1679.

МЕДИЦИНСКАЯ РОБОТОТЕХНИКА. ПЕРФУЗИОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ ДЛЯ ТРАНСПЛАНТАЦИИ И РЕАНИМАЦИИ / ROBOTICS IN MEDICINE. PERFUSION COMPLEXES FOR TRANSPLANTATION AND RESUSCITATION

V.V. Uyba

MAIN DIRECTIONS OF WORKS ON CREATION OF MEDICAL ROBOTIC SYSTEMS OF NEW GENERATION

Federal Medical Biological Agency of Russia, Moscow
uiba@fmbaros.ru

В.В. Уйба

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАБОТ ПО СОЗДАНИЮ МЕДИЦИНСКИХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

ФМБА России
uiba@fmbaros.ru

Сохранение здоровья, качества жизни и продление профессионального долголетия лиц, работающих в условиях воздействия особо опасных факторов - это не только гуманитарная, социальная, экономическая миссия, а также фактор национальной безопасности, но и одна из важнейших задач Федерального медико-биологического агентства, осуществляющего медико-санитарное обеспечение указанных работников.

В ходе выполнения этой задачи ФМБА России уделяет значительное внимание разработке и внедрению в повседневную практику инновационных медицинских технологий и относит новейшие тренды современной медицины в ряд приоритетных научных и практических задач.

Учитывая тот факт, что обслуживаемый Агентством контингент подвергается воздействию особо опасных факторов физической и химической природы, в ФМБА России в рамках медико-биологического сопровождения НИОКР по разработке роботизированных комплексов, направленных на усиление физиологических возможностей организма человека, накоплен большой опыт создания и оценки эффективности средств индивидуальной защиты, разработана технология профессионального и медицинского отбора спецконтингента для работ в условиях сверхнормативного воздействия опасных и особо опасных факторов труда, в том числе облучения, с учетом их индивидуальной радиорезистентности при воздействии ионизирующего излучения, а также в условиях повышенных физических и психоэмоциональных нагрузок.

I. В настоящее время ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России располагает средствами оценки физической работоспособности, функционального состояния, адаптационных и резервных возможностей лиц экстремальных профессий.

С их помощью могут быть выполнены:

1. Определение физической работоспособности по результатам максимальных нагрузочных тестов («до отказа») с использованием тренажеров, позволяющих имитировать различные виды физической активности.

2. Определение прямым методом (с помощью газоанализа) максимального потребления кислорода (МПК), порогов аэробного и анаэробного обмена (ПАО и ПАНО), максимальная частота сердечных сокращений, максимальная мощность и время нагрузки.

3. Оценка функционального состояния и отягощающего действия специального и защитного снаряжения в крайних климатических условиях (климатическая комната).

4. Контроль потоотделения, определение его порога и эффективности в комфортных и крайних климатических условиях, в том числе при использовании специального снаряжения.

5. Определение психофизиологического и психоэмоционального состояния у лиц экстремальных профессий. Оценка функционального состояния человека, выявления острого и хронического утомления, психоэмоционального перенапряжения и уровня стресса.

6. Определение неспецифических (интегральных) и специфических критериев адаптированности организма человека при воздействии любого фактора внешней среды: работоспособность и переносимость физических и психоэмоциональных нагрузок.

Все используемые методики являются уникальными, персонифицированными и апробированы на прикрепленном контингенте.

II. Одним из основных направлений использования робототехники является космическая медицина. Её развитие обусловлено целями, задачами и особенностями перспективных космических миссий.

Неблагоприятными медицинскими факторами в данном случае будут:

- повышенный уровень радиации;
- гипогравитация;
- отсутствие магнитного поля;
- увеличение сроков медицинской эвакуации до 3-5 суток (при необходимости);
- увеличение времени задержки связи до 1-2 минут.

Работы по строительству и эксплуатации орбитальной станции потребуют участия в составе экипажей опытных космонавтов, уже (возможно) имеющих определенные проблемы в состоянии здоровья.

Это обстоятельство, а также воздействие дополнительных неблагоприятных факторов в условиях длительного полёта неизбежно приведут к повышению вероятности возникновения в ходе выполнения космических миссий патологических состояний и заболеваний, что повлечёт за собой необходимость размещения на этих бортах оборудования для проведения диагностических, лечебных и коррекционных (реабилитационных) медицинских мероприятий.

Использование робототехники, автоматизированных лечебнодиагностических комплексов может существенно расширить арсенал медицинским диагностических и лечебных процедур, проводимых непосредственно на борту космического корабля.

III. Важным инновационным вариантом современной роботизированной реабилитации пациентов с различными двигательными нарушениями является использование реабилитационных экзоскелетов с биологической обратной связью.

В лаборатории клинической биомеханики ФГБУ ФНКЦ ФМБА России совместно с корпорацией Алмаз-Антей и Поволжским Университетом разработана принципиально новая концепция экзоскелета, которая позволяет целенаправленно восстанавливать движения в коленном и тазобедренном суставах с использованием собственных ресурсов (остаточная сила мышц). Разрабатываемые алгоритмы работы позволят применять экзоскелет у больных после позвоночно-спинномозговых и черепно-мозговых травм, церебрального инсульта, травм нижних конечностей, повреждений периферических нервов, а также после оперативных вмешательств на опорно-двигательной системе.

IV. С начала 1980-х годов активно развивается роботизированная хирургия. Одним из первых автоматических аппаратов в хирургии был именно «Da Vinci». В настоящее время робот-ассистированная хирургическая система «Da Vinci» — аппарат для проведения хирургических операций - остается пока единственным монополистом на рынке медицинской робототехники.

Начиная с 2000 г. и до настоящего момента создано несколько поколений робитизированных хирургических систем «Da Vinci»:

- daVinciSi - мобильная модель;
- daVinciXi - модель для фиксированной установки;
- daVinciX - может ставиться на тележку и быть мобильным;
- с включением голосом;
- с применением лазерных систем наведения и 3D оптической системы.

Хотя такую систему и называют роботом, она не может проводить операции самостоятельно. Любые манипуляции «Da Vinci» осуществляются под контролем квалифицированного врача, имеющего опыт управления подобными системами.

В Москве 6 апреля 2017 прошла презентация первого отечественного роботизированного комплекса, предназначенного для проведения хирургических вмешательств.

Работа по созданию первого российского робота-хирурга велась 3,5 года. В его создании принимали участие коллективы ученых из 22 научно-исследовательских институтов, в том числе специалисты ФМБА России.

Свою поддержку проекту оказали Федеральное агентство научных организаций, Министерство здравоохранения РФ, Фонд «Сколково» и другие.

Созданный в результате совместных усилий робот-хирург оказался в 5 раз легче американского «Da Vinci», который весит больше тонны. К тому же новый прибор получился более компактный - все агрегаты можно поместить в один чемодан, и с таким багажом отправиться оперировать в любой уголок страны. Кроме того новый робот гораздо дешевле своего предшественника, цена которого доходила до 3,5-4 млн. долларов.

Но самое главное - российский ассистент хирурга в 10 раз точней «американца», благодаря чему с ним гораздо удобнее работать, оперируя, например детей. Это уже не аналоговая, а цифровая система с точностью до 5 микрон, подстраивающаяся под конкретные руки конкретного доктора.

V. Ещё одно направление примененииия роботизированных комплексов - эстракорпоральная мембранная оксигенация (ЭКМО) - используется у пациентов с остро развившейся и потенциально обратимой кардио-респираторной недостаточностью, которые не отвечают на стандартную терапию.

ЭКМО не является ЛЕЧЕБНОЙ мерой, а является органозаместительной методикой, позволяющей пережить состояние шока и время на восстановление органа, или позволяет пациенту дождаться трансплантации.

В связи с бурным развитием и острой востребованностью роботизированных комплексов в клинической практике в ФМБА России разработаны предложения по:

I. Проведению медико-биологических испытаний с оценкой функциональных резервов и работоспособности биообъекта, использующего экзоскелет и другие робототехнические устройств.

В течение ряда лет в ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России осуществляется проведение медико-биологических испытаний изделий и специальных средств, направленных на усиление физиологических возможностей организма человека и использующих физические факторы воздействия (ионизирующее излучение, ультразвук, инфразвук, лазерное и электромагнитное излучение) на биологические объекты, а так же поведение биомоделей при экстремальных воздействиях.

Изучаются реакции биообъекта на организменном, тканевом, клеточном и субклеточном уровнях. Кроме этого разрабатываются и внедряются в практику методики оценки и коррекции адаптационных и функциональных резервов спортсменов сборных команд Российской Федерации в различных климатогеографических условиях путем искусственного моделирования условий адаптации, (климатические камеры, оборудование для создания искусственной гипоксии и др.) при подготовке к крупнейшим мировым соревнованиям.

На основе вышеизложенного разработаны предложения по проведению медико-биологических испытаний с оценкой функциональных резервов и работоспособности биообъекта, использующего экзоскелет и другие робототехнические устройства:

1. Проведение функционально-нагрузочных проб (специфическая нагрузка, Вингейт-тест) с оценкой реакции системы обеспечения на нагрузку.
2. Оценка влияния низких и высоких температур, уровня гипоксии и влажности на функциональное состояние и работоспособность объекта (климатическая комната).
3. Оценка силовых, скоростных, мощностных качеств, а также показателей мышечной выносливости в различных нагрузочных режимах, включая проведение статэргометрии. (Роботизированный биомеханический комплекс Кон-Трекс, прыжковая и координационная платформы).
4. Широкий спектр оценки психоэмоционального состояния и влияния уровня стресса на функциональное состояние и работоспособность.
5. Оценка гематологического и гормонального профиля.
6. Оценка радиорезистентности биообъекта при воздействии различных видов облучения (ионизирующее излучение, ультразвук, инфразвук, лазерное и электромагнитное излучение), том числе и при применении различных средств индивидуальной защиты, а также определение критериев оценки безопасных условий воздействия.

7. Адаптация и применение технологии отбора биообъекта для работ в условиях сверхнормативного облучения с учетом их индивидуальной радиорезистентности.

II. Проведению научно-прикладных исследований и экспериментов, направленных на медико-санитарное обеспечение длительных космических полетов.

В настоящее время применение изделий робототехники рассматривается как значимый ресурс обеспечения жизнедеятельности человека-оператора в экстремальных условиях среды обитания. В большей степени это положение относится к роботам - помощникам и сервисным роботам, возможности применения которых для поддержки деятельности экипажа пилотируемого космического комплекса постоянно расширяются.

Представляется, что сегодня в области построения и совершенствования роботизированных биотехнических систем следует ожидать получения значимых результатов при решении практических задач поддержки жизнедеятельности и снижения рисков здоровью космонавтов на борту пилотируемого комплекса.

В связи с этим на первый план выходит разработка специальных средств диагностики и лечения заболеваний и реабилитации космонавтов во время межпланетного полёта и при нахождении на планетарных базах, включая разработку миниатюрных диагностических медицинских систем, позволяющих проводить диагностику и оперативно принимать решения по оказанию медицинской помощи при различных заболеваниях во время межпланетного полёта и при нахождении на планетарных базах, а также информационных и роботизированных систем, обеспечивающих оказание медицинской помощи в автономных условиях, в том числе при помощи вживляемых микрофлюидных систем подачи и дозирования лекарственных средств.

Можно выделить следующие направления использования медицинских диагностических роботов:

– УЗИ аппаратура с дистанционным управлением;

– автоматизированные системы лабораторной диагностики (анализы крови и мочи);

– Автоматизированные комплексы регистрации физиологических показателей (АД, ЭКГ);

– аппаратура для регистрации и передачи аускультативных шумов.

Робототехника для медицинских процедур:

– аппаратура для пункции и катетеризации вен;

– автоматические комплексы для инфузионной терапии с системой обратной связи;

– аппаратно-программные комплексы для эндоскопических медицинских манипуляций (ЭГДС, лапароскопия, бронхоскопия) с системой дистанционного контроля и передачи видеоинформации.

В настоящее время такие системы российского производства отсутствуют.

Отдельные элементы и принципы их работы отрабатывались на уровне НИОКР.

III. Оказанию медицинской помощи пациентам с нарушениями опорно-деигательного аппарата.

Специалисты ФМБА России определили область научных исследований, направленных на анализ и коррекцию движения, атакжена развитие реабилитационных методик с применением компьютерных технологий и робототехники.

В последнее время в мире широко развиваются научные программы и разработки, связанные с созданием высококачественного оборудования и систем нейрореабилитации, основанные на принципах биологической обратной связи, робототерапии, современных систем визуализации нейрореабилитационного процесса, включая внедрение в него видеоанализа движений, систем разгрузки веса, современных технологий облегчения активных и пассивных движений в парализованной конечности.

Методы объективной оценки параметров ходьбы с целью определения нозологии, степени выраженности двигательного дефекта, лечебной или реабилитационной тактики основаны на инструментальной регистрации параметров ходьбы и могут быть использованы при лечении нарушений равновесия и ходьбы у неврологических больных.

В настоящее время основные перспективы восстановления движений в периоде реабилитации связаны с использованием:

– робототехнических устройств;

– методов точной регистрации движений (биомеханики) и функции мышц;

– функциональной электрической стимуляции (ФЭС);

– технологий биологической обратной связи (БОС);
– интерфейсов мозг-компьютер (ИМК);
– виртуальной реальности (ВР).

Предлагаемый комплексный подход, по сравнению с существующими, является более сложным технически и методически. Поэтому предложение таких систем на мировом рынке немногочисленно и зачастую финансово ограничено. Лидерами таких систем являются компании Носоша (Швейцария), Meditouch (Израиль), Ekso-Bionics (США) и ряд других.

В ФГБУ ФНКЦ ФМБА России создана новая лаборатория клинической биомеханики, обладающая уникальными возможностями исследования биомеханики ходьбы, диагностики патологии движений и функциональной реабилитации.

Возможная область применения:

– здоровые лица – для оценки развития (профпригодность) и повышения качества моторных навыков;

– в педиатрии – для диагностики и развития моторных навыков у здоровых детей и детей с патологией двигательной системы (ДЦП);

– здоровые пожилые лица - для тренировки двигательных и когнитивных нарушений (профилактика снижения исполнительных функций);

– лица с патологией опорно-двигательного аппарата и нервной системы - для оценки нарушений и тренировки навыков восстановления.

IV. Реабилитации нарушений опорно-двигательного аппарата.

Восстановление движений, нарушенных в результате различных повреждений опорно-двигательного аппарата и ЦНС, в том числе, в результате боевой травмы, которая является одной из существенных проблем. Как правило, в молодом возрасте, имеется высокий реабилитационный потенциал, что в перспективе позволяет восстановить двигательную активность с максимальным эффектом.

В связи с этим возникает необходимость разработки и испытания на базе научно-исследовательских и лечебных учреждений ФМБА России гибридной системы восстановления движений на основе классификатора для клиникоинструментальной оценки движений человека (ходьба, равновесие, мимика, рука, отдельных синергий- движений) для решения задач восстановления и совершенствования сенсомоторных функций и проведения клинико-инструментальной оценки моторного профиля конечностей на основе бесконтактной регистрации движений, направленных на:

– диагностику и коррекцию нарушений мышечного тонуса;
– коррекцию тонкой моторики конечностей;
– восстановление движений и компенсация нарушенных функций конечностей;
– оценку состояния и целенаправленную тренировка моторных навыков у представителей отдельных профессий.

Немаловажное значение имеет проблема восстановления и реабилитация речи при афазиях (локальных отсутствиях или нарушениях уже сформировавшейся речи, возникающих при органических поражениях речевых отделов коры (и «ближайшей подкорки») головного мозга в результате перенесённых травм, опухолей, инсультов, воспалительных процессов и при некоторых психических заболеваниях) и дизартриях (ограничениях подвижности органов речи (мягкого нёба, языка, губ), из-за чего затруднена артикуляция) у взрослых пациентов после перенесенной органической патологии ЦНС.

В ФМБА России есть собственный опыт разработки таких систем и их компонентов, вплоть до серийно производимых устройств и систем в данной области. В частности систем интеллектуальных приводов экзоскелета нижних конечностей, позволяющих оценивать вклад собственных усилий пациента в данное движение с анализом работы соответствующих групп мышц в целостном двигательном акте. С участием специалистов ФМБА России разработаны комплексы клинической регистрации биомеханики движений человека с использованием безплатформенных инерционных систем.

Разработаны более сложные системы с использованием совместно технологий биологической обратной связи и

функциональной электрической стимуляции для восстановления движений в нижних конечностях.

Одна из самых сложных разработок - комплекс восстановления движений у тяжелых больных с использованием виртуальной реальности.

Кроме этого, клиническая база ФМБА России, наличие научных кадров позволяют, как принимать активное участие в медико-биологическом сопровождении разработки технической документации по созданию медицинской робототехники, так и проводить полный цикл клинических испытаний таких систем, включая сертификационные.

С целью создания наукоемких высокотехнологичных медицинских роботизированных комплексов для решения задач, стоящих перед ФМБА России, а также импортозамещения указанных изделий предлагаем на основании имеющегося научно- технического потенциала и производственных возможностей отечественных промышленных предприятий разработать программу на среднесрочную перспективу по медико-биологическому сопровождению разработки и внедрения инновационных образцов медицинских роботизированных комплексов и технологий их производства.

Исходя из важности проведения подобных исследований и влияния их результатов на конечное изделие, мы предлагаем осуществлять медико-биологическую экспертизу на всех стадиях разработки изделий медицинской робототехники и их практическую апробацию до постановки на производство.

V.F. Golovin[1], M.V. Arhipov[2], L.B. Kocherevskaya[3]

ROBOTICS FOR INCREASING MILITARY CAPACITY

[1]CMRVSM, Moscow, medicalrobot@mail.ru
[2]MOSPOLYTECH, Moscow, medicalrobot@mail.ru
[3]NIU MAI, Moscow, ladk05@yandex.ru

Abstract

This article is devoted to the issues of increasing the combat capability of military and civil servants of special security services. An important problem of increasing the fighting capacity of servicemen before combat operations and relieving the stress after hostilities is the mass character and accessibility of the services of masseurs. To solve this problem, it is proposed to use the hardware of massage - manipulation robots. A variant of the compliant control for training the robot by demonstration is considered. The effectiveness of increasing the combat capability of servicemen can be achieved through the control of the psycho physiological state during the therapy.

Key words: military, robotics, massage, manipulations, fighting efficiency, diagnostics, admittance control, demonstration.

В.Ф. Головин[1], М.В. Архипов[2], Л.Б. Кочеревская[3]

РОБОТОТЕХНИКА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ БОЕСПОСОБНОСТИ ВОЕННОСЛУЖАЩИХ

[1]МНПЦМРВиСМ, Москва,medicalrobot@mail.ru
[2]МПУ, Москва,medicalrobot@mail.ru
[3]НИУ МАИ, Москва, ladk05@yandex.ru

Аннотация

Данная статья посвящена вопросам повышения боеспособности военных и служащих специальных служб безопасности. Важной проблемой повышения боеспособности военнослужащих перед боевыми действиями и снятия стресса после боевых действий является массовость и доступность услуг массажистов. Для решения этой проблемы предлагается использовать аппаратные средства массажа – манипуляционные роботы. Рассматривается вариант податливого управления для обучения робота демонстрацией. Эффективность повышения боеспособности военнослужащих можно решить за счет контроля психофизиологического состояния в процессе терапии.

Ключевые слова: военнослужащие, робототехника, массаж, манипуляции, боеспособность, диагностика, податливое управление, демонстрация.

Введение

В настоящее время медицинская робототехника как экстремальная робототехника рассматривается в двух приложениях: терапевтическая, в основном в хирургии и реабилитационная, как разработка протезов. Робототехника для восстановительной медицины, в том числе как общеукрепляющий профилактический массаж для повышения боеспособности военнослужащих перед боевыми действиями и снятия стресса после боевых действий, не является приоритетной темой и не развивается.

Военнослужащим, выполняющим ответственные задания, когда от результатов их действий зависят судьбы людей, необходима не только физическая, но и психологическая подготовка. Физическая подготовка военнослужащих является необходимой компонентой, но в основном преобладают активные упражнения. Возможности релаксации ограничены. Кроме того условия современных боевых действий связаны с высокой ответственностью выполнения задания, а потому с большими психологическими перегрузками.

Известен положительный опыт работы массажных корпусов для военнослужащих в Британии в 1914 году [10]. В начале 2000-х сообщается о массаже для военных с симптомами перемены места. Симптомы: проблемы с засыпанием, просыпанием посреди ночи, сложности с сексуальной близостью, усталость, чувство нервозности, подвержены испугу [9].

Рисунок 1 – Военные с симптомами перемены места

В работе [11] показано, что дополнительная и альтернативная медицина (complementary and alternative medicine), в том числе массажная терапия, является широко используемой формой медицинского обслуживания в Соединенных Штатах и что использование этих методов лечения увеличилось с тех пор, как такие обследования были впервые проведены в 1990 году. В этом исследовании представлены результаты опроса 2013 года, около 1,3 миллиона военнослужащих, работающих в режиме реального времени, которые получают медицинскую помощь, как в военной, так и в гражданской системах. Исследователи предположили, что военнослужащие сталкиваются с такими же рисками для здоровья, как и у гражданских лиц, с дополнительными физическими, эмоциональными и когнитивными стрессами, связанными с развертыванием и борьбой, и предполагают, что они с большей вероятностью будут искать дополнительные подходы к поддержанию и улучшению здоровья и производительности труда.

Методы лечения были сгруппированы в пять категорий, которые используются Национальным центром дополнительного и интегративного здоровья. Это альтернативные медицинские процедуры, такие как иглоукалывание и восточная медицина или гомеопатия; биологически основанные методы лечения, такие как фитотерапия, диета и поливитамины; манипулирующие на теле методы, такие как хиропрактика и массажная терапия; медико-биологические методы лечения, такие как биологическая обратная связь, управляемые образы, методы релаксации, физические упражнения или методы передвижения, группы самопомощи и искусство; энергетические терапии, такие как Рейки. Данные были проанализированы с помощью системы специализированного программного обеспечения, предназначеные для детального статистического анализа. Наиболее популярной терапией была

массажная терапия, используемая у 14,1% респондентов. Другие терапии с высокими показателями использования включали релаксационные методы (10,8%), фитотерапию (8,9%), поливитамины с высокой дозой (8,4%), терапию искусством (7,7%), физиотерапию / двигательную терапию (6,8%) и хиропрактики (5,2 процента).

Профилактическая направленность общеукрепляющего массажа для военнослужащих

Массаж для военнослужащих, особенно массовый, крайне трудоёмок и требует привлечения большого количества массажистов. Поэтому реализация массовости возможна лишь с применением аппаратных средств массажа.

Массаж для здоровых людей имеет профилактическое значение. Не лечить больных, а не допускать болезни! Это утверждали великие русские физиологи Павлов И.П. и Пирогов Н.И. [7]. Это - существо концепции восстановительной медицины. Подготовка к выполнению ответственных боевых заданий – это своеобразная профилактика.

Если в начале прошлого века робототехника выглядела фантастикой и об аппаратных средствах массажа в том числе для здоровых людей русский врач Заблудовский И.В. только мечтал в своей диссертации, то технологии сегодняшнего дня позволяют создать неутомимые манипуляционные роботы для массового выполнения множества техник классического и точечного массажа [1].

В первую очередь специальные комплексы активных движений и робототехнического массажа необходимы военнослужащим, большую часть времени работающим в условиях ограниченного помещения, например, подводникам и космонавтам.

Снятие напряжения особенно необходимо для находящихся на ответственных дежурствах ракетчиков. Большая, хотя и кратковременная физическая и психологическая нагрузка ложится на лётчиков-испытателей, сотрудников МЧС. Для них также необходим общеукрепляющий массаж с применением робототехники.

В настоящее время в России и на Западе существует множество роботов, часто с развитым сервисом, например, способных работать без ограждения. Такие разработки позволяют создание роботов, разрешающих в своей рабочей зоне выполнять более тонкие массажные приёмы, беря основную силовую работу на себя. Для повышения эффективности восстановления боеспособности военных, как до, так и после нагрузки, необходим контроль психофизиологического состояния в процессе восстановления. Цель процедуры для военных будет заключаться в повышении боеспособности за счет достижения заданных значений измеряемых психофизиологических параметров. Массажное воздействие проявляется в большей степени в тонусе мышц и в электрокожном сопротивлении [5]. Контроль эффективности и прогресса воздействия по предлагаемой методике обеспечит дозированность, индивидуальный подход к каждому военному, позволит учесть специфику нагрузки на локальные мышцы.

Массаж для военнослужащих, особенно массовый, трудоёмкий и требует привлечения армии массажистов. Поэтому реализация массовости возможна лишь с применением аппаратных средств массажа, в особенности с применением манипуляционных роботов, способных выполнять массажные движения аналогично руке массажиста [4].

Прежде всего, методики должны быть направлены на выполнение массажа на совершенно здоровых военнослужащих, повышая их боеспособность. Поэтому в основу массажных техник в первую очередь должны быть взяты приёмы не лечебного, а спортивного массажа. Следующие разработки могут включать элементы более тонкой работы с травмированными пациентами.

Спортивный массаж прежде всего создан для совершенствования физического состояния спортсмена с целью мобилизации его в соревновательный период, скорейшего восстановления после тяжелых физических и психологических перегрузок [2].

Разделяют тренировочный, предварительный и восстановительный спортивный массаж. Предварительный спортивный массаж делают непосредственно перед тренировкой или физическими нагрузками, что увеличивает функциональные возможности организма. Тренировочный спортивный массаж входит в состав тренировочного процесса и снимает утомления и перенапряжение спортсменов во время тренировок. Он направлен на увеличение амплитуды движений, улучшение эластичности связок, умение расслаблять определенные группы мышц. Восстановительный спортивный массаж применяется после нагрузок. Он мобилизует восстанавливающие силы организма, повышая работоспособность спортсмена и рост спортивных результатов. Повышенное внимание уделяется восстановительному массажу [3].

Аналогичные фазы спортивного массажа могут быть рекомендованы для военнослужащих – до и после выполнения ответственной операции.

Основные приёмы спортивного массажа, выполняемого мануально, описаны в монографии [3]. Некоторые из них могут быть акцентированы спецификой боевой подготовки.

Робототехника для массажа

Многие приёмы спортивного массажа, выполняемого мануально, могут быть выполнены манипуляционными роботами, на основе уже имеющихся серийно выпускаемых.

В настоящее время в России и на Западе существует множество роботов, часто с развитым сервисом, например, способных работать без ограждения [8]. Такие разработки позволяют создание роботов, разрешающих в своей рабочей зоне выполнять более тонкие массажные приёмы, беря основную силовую работу на себя.

В Пекинском университете разработан манипуляционный робот (рис. 2), выполняющий приёмы массажа на макете и пациенте-человеке [12]. В Сингапуре на основе робота UP10 (рис. 3) разработан манипуляционный робот для выполнения спортивного массажа [13]. К сожалению, методы обучения этих роботов не рассматриваются.

Рисунок 2 – Манипуляционный робот, разработанный в Пекинском университете

Рисунок 3 – Кисть манипуляционного робота, разработанного в Сингапуре на основе робота UP 10

На рис. 4 представлен робот для выполнения массажа, разработанный в МГИУ. Основой прототипа является робот РМ-01[5]. Для адаптации к геометрии пациентов робот снабжён автоматической системой позиционно-силового управления, а чтобы объективно оценивать прогресс психофизиологического состояния пациента - предусмотрена система биотехнического управления [5]. Робот дополнен однокомпонентным каналом силового управления. Это добавление позволяет задавать необходимые усилия деформирования мягких тканей с помощью т.н. “силовых” точек [6]. Силовая точка содержит кроме данных положения только одну силовую компоненту, измеряемую однокомпонентным датчиком усилия вдоль инструментальной оси робота, направляемой перпендикулярно к поверхности мягкой ткани. Робототехнический массаж рассматривается как контактное, управляемое, неинвазивное, с повторами деформирование мягких тканей.

Значительное уменьшение времени обучения робота необходимым траекториям с учётом усилий деформирования мягких тканей достигается при использовании предлагаемого мануального обучения робота демонстрацией от задающей рукоятки [8]. Структура робота для предлагаемого метода

мануального обучения демонстрацией от задающей рукоятки приведена на рис.6. Кроме предложенного метода обучения рассматривается реализация совместной работы робота и врача, безопасность и воспроизведение роботом обученных траекторий с приоритетом усилия.

Исследовательский робот серии LBR iiwa (рис. 5) включает режим податливого управления и при дооснащении является наиболее подходящим для задачи выполнения разнообразных массажных приемов.

Рисунок 4 – Робот МГИУ для выполнения приёмов массажа и движения конечностей в суставах

Рисунок 5 – Робот LWR, который может быть использован для выполнения массажа

Предлагаемый метод обучения демонстрацией с деформированием мягких тканей предполагает прямую запись движений оператора-массажиста с учётом реального деформирования мягких тканей пациента и затем воспроизведение роботом записанных движений. Метод не требует априорного знания усилий взаимодействия руки робота и мягких тканей. Усилия вносятся в систему управления робота не программно, а мануально оператором-массажистом, который не знает численных значений усилий, но выполняет управляемое деформирование мягких тканей, полагаясь на свои ощущения и опыт. Записанная траектория обучения демонстрацией с деформированием мягких тканей несёт в себе и реальные движения массажиста, и усилия которые он развивает. Для выполнения обучения робот должен иметь режим податливого управления.

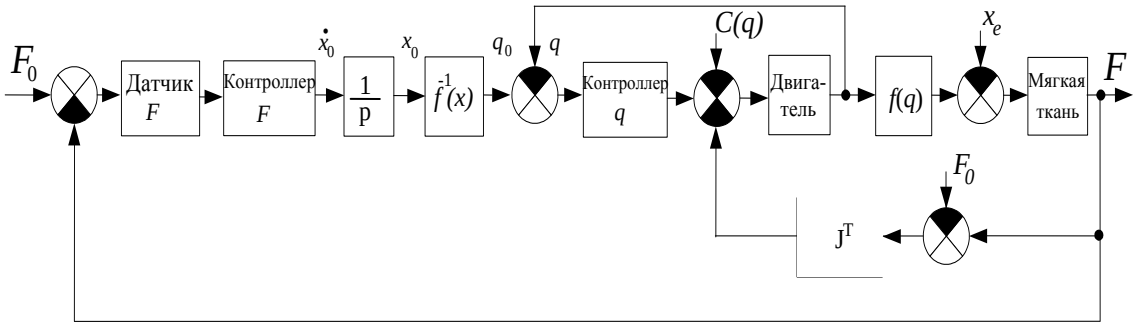


Рисунок 6 – Функциональная схема системы обучения демонстрацией с многокомпонентным силовым датчиком с учётом деформирования мягкой ткани.

На рис. 6. $\boldsymbol{F}_0$ и $\boldsymbol{F}$ – векторы усилий, задаваемых рукояткой врача-оператора и реальной реакции мягкой ткани (см. рис. 7). $f(x)$ и $f^{-1}(q)$ - преобразователи координат в обратной и прямой кинематических задачах.

Преимущества обучения робота демонстрацией необходимого непрерывного движения с деформированием мягких тканей перед методом обучением “силовых” точек следующие:

– быстрый и удобный подвод инструмента к участку или точке без пульта ручного управления, а непосредственно инструментом;

– установка необходимого усилия непосредственно рукой массажиста на инструменте.

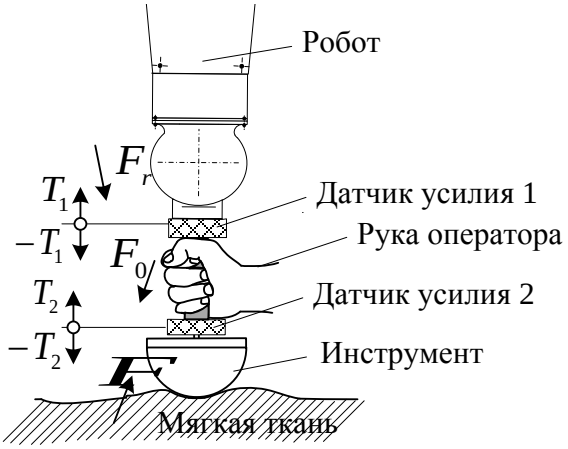


Рисунок 7 – Усилия, прилагаемые к роботу со стороны оператора и среды

На рис. 7 шестикомпонентный датчик усилия 1 измеряет разность усилий ($\boldsymbol{F}_0$–$\boldsymbol{F}$), шестикомпонентный датчик усилия 2 измеряет реакцию мягкой ткани. $\boldsymbol{F}_r$ - усилие, развиваемое приводами.

Эффективными аппаратными средствами массажа являются массажные кресла. В сравнении с роботом кресла имеют некоторые преимущества: большая концентрация необходимых движений в малом объёме рабочей зоны, посадка пациента в кресло гарантирует его ориентацию, большие усилия за счёт малых рычагов в кресле. Однако преимущества роботов более значительны: большая мобильность и разнообразие движений в сравнении с креслом, возможность массажа передней поверхности тела пациента, в том числе лица, возможность захватных приёмов и применения инструментов для массажа, возможность выполнения движений конечностей в суставах.

Объективизация действия массажа

Для повышения эффективности восстановления боеспособности военных, как до, так и после нагрузки, необходим контроль психофизиологического состояния в процессе восстановления. В программах восстановления боеспособности военных комплекс мероприятий должен включать элементы диагностики основных психофизиологических параметров, в которых отражается прогресс состояния при массажном воздействии. Цель процедуры для военных будет заключаться в повышении боеспособности за счет достижения заданных значений измеряемых психофизиологических параметров.

Диагностируемыми параметрами могут быть следующие: электромиограмма, тонус мышц, электроэнцефалограмма, артериальное давление, реограмма, электрокожное сопротивление, частота сердечных сокращений, тремор и др. Стоит отметить, что из всех перечисленных параметров массажное воздействие проявляется в большей степени в тонусе мышц и в электрокожном сопротивлении. В ряде работ показано, что электрокожное сопротивление однозначно отражает эффекты тонизации и релаксации, характеризуя эмоциональное состояние человека [5]. Тонус мышц является показателем их расслабленности. Данные параметры могут быть получены с помощью диагностических приборов: для электрокожного сопротивления используется система «Альфаритмика», для тонуса мышц - миотонометр (например, Миотонус-5). Сигналы данных приборов вводятся в систему управления роботом и обрабатываются специальной управляющей программой, изменяющей режимы работы манипуляционного робота. Контроль эффективности и

прогресса воздействия обеспечит дозированность, индивидуальный подход к каждому военному, позволит учесть специфику нагрузки на локальные мышцы.

Выводы

Проведение робототехнического массажа для повышения боеспособности военнослужащих сдерживается медицинскими и техническими проблемами. Медицинские проблемы связаны с созданием методик массового обслуживания военнослужащих. Это проблемы быстрой адаптации робота к индивидуальным особенностям пациента-военнослужащего, объективизации результатов процедуры и совместной работы робота и врача для выполнения более тонких приёмов. Технические проблемы в настоящее время решаются с помощью достижений современной робототехники. Основные технические исследовательские задачи направлены на создание такого режима податливого управления, который позволит массажисту, обучающему робот, не ощущать влияние робота.

1. Заблудовский И.З., диссертация «Материалы к вопросу о действии массажа на здоровых людей». — СПб.: 1882 г.
2. Бирюков А.А. Классификация, методика и техника приёмов спортивного массажа.// Теория и практика физической культуры, 1978, №1. — С. 31 — 35.
3. Бирюков А.А., Васильева В. Спортивный массаж. Издательство: Физкультура и спорт, 1981
4. Разумов А.Н., Бирюков А.А., Головин В.Ф., Архипов М.В. Повышение боеспособности военнослужащих применением робототехники для восстановительной медицины // Труды IV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Лечебная физическая культура: достижения и перспективы развития». - М.: ГЦОЛИФК, 2015. - С. 664—671.
5. Головин В.Ф., Архипов М.В., Журавлёв В.В. Робототехника в восстановительной медицине. Роботы для механотерапии. LAP LAMBERT Academic Publishing, GmbH & Co. KG, 2012, 280 p.
6. Головин В.Ф., Саморуков А.Е. Способ массажа и устройство для его осуществления, Рос.патент № 2145833 от 08.05.1998.
7. Разумов А.Н., Ромашкин О.В. Оздоровительная физкультура в восстановительной медицине 2 издание, М.: МДВ, 2007.
8. Arkhipov M., Leskov A., Golovin V., Gercik Y., Kocherevskaya L. Prospects of Robotics Development for Restorative Medicine. Proceedings of the 25th Conference on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region (RAAD16), 2017, Springer, 2016, p.499-506
9. Военный массажный корпус «Алмерик Паже» http://www.nationalarchives.gov.uk/womeninuniform/almeric_paget_intro.htm
10. Массаж для военных. http://olympic.massagetherapy.com/military-massage.
11. Исследования: массажная терапия + военный персонал. 2015 г. https://www.amtamassage.org/articles/1/News/detail/3333
12. Massage robot. http://robohub.org/massage-robot-youtube/
13. Robot therapist hits the right spot with athletes. http://www.todayonline.com/sports/robot-therapist-hits-right-spot-athletes

B.A. Luskin, D.O. Semenov, A.I. Zakharov

DEVELOPMENT (DESIGNING) OF ROBOTIC COMPLEXES IN CDB ME “RUBIN”

CDB ME “RUBIN”, Saint-Petersburg
ckb-rubin.ru

Д.О. Семенов, А.И. Захаров, Б.А. Лускин

ПРОЕКТИРОВАНИЕ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ В ЦКБ МТ «РУБИН»

ОАО "ЦКБ МТ "Рубин", Санкт-Петербург
ckb-rubin.ru

Основные тезисы

– Морская робототехника как одно из основных направлений развития подводного кораблестроения;

– Комплексный подход к проектированию морских подводных робототехнических комплексов;

– Изготовление робототехнических комплексов;

– Работы по стандартизации в области морской робототехники;

– Создание единого центра компетенции на о. Котлин, в т.ч. создание производственной и испытательной полигонной базы морской робототехники.

С начала 90-х годов прошлого столетия в интересах Министерства Обороны Российской Федерации АО «ЦКБ МТ «Рубин» ведутся масштабные работы в области создания морских робототехнических комплексов и систем различного назначения. Принципиальной особенностью функционирования таких технических средств является способность решать поставленные задачи в крайне агрессивных условиях морской среды во всем диапазоне глубин Мирового океана во всех его районах от самых южных широт до Северного полюса.

Выполнение работ с помощью обитаемых технических средств – подводных аппаратов, особенно в глубоководных районах, в толще воды и на дне Мирового океана неразрывно связано с риском для жизни эксплуатирующего личного состава. Применение робототехнических комплексов на основе автономных и телеуправляемых подводных аппаратов позволяет вывести человека из зоны повышенного риска и обеспечить более полное и всестороннее представление о текущей ситуации для эффективного выполнения задачи.

В настоящее время АО «ЦКБ МТ «Рубин» ведутся работы по созданию робототехнических комплексов на базе легких АНПА – «Юнона» и «Амулет».

Крупным этапом в деятельности бюро стало развертывание в 2013 году работ по созданию перспективного комплекса автономного необитаемого подводного аппарата проекта «Клавесин-2Р-ПМ». Данный АНПА можно отнести к классу средних аппаратов.

В 2016 году под эгидой Фонда перспективных исследований АО «ЦКБ МТ «Рубин» реализован важнейший этап работ по созданию рекордного комплекса для сверхглубоководного погружения «Витязь».

Разрабатываются комплексы тяжелых и сверхтяжелых АНПА, предназначенных для решения ряда сложных, комплексных задач как исследовательского, так и оборонного применения.

Рисунок 1 – Применение обитаемых и необитаемых подводных аппаратов

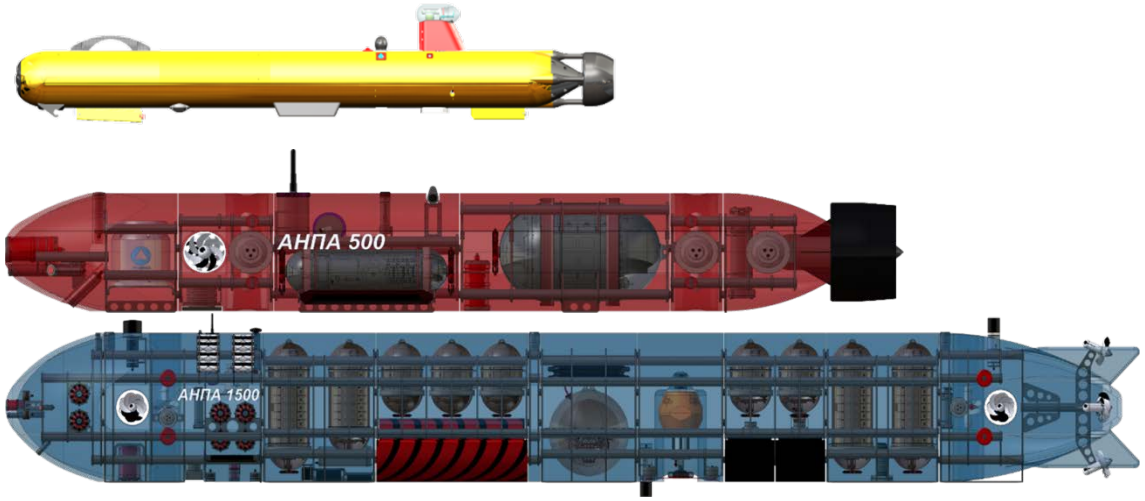


Рисунок 2 – АНПА различных классов

Создание техники данного класса производится АО «ЦКБ МТ «Рубин» с применением современных методов проектирования.

Так, например, технический проект АНПА «Клавесин-2Р-ПМ» был выполнен с применением компьютерного 3D моделирования. На этом важнейшем этапе опытной конструкторской работы была создана полная 3-х мерная модель АНПА, включающая в себя корпусные конструкции, прочные контейнеры, внешнее радиоэлектронное вооружение и блоки плавучести. Также в модели АНПА была выполнена трассировка прокладки электрических кабелей между прочными контейнерами с радиоэлектронным вооружением.

На базе 3D модели АНПА «Клавесин-2Р-ПМ» была создана математическая модель движения аппарата в условиях широкого диапазона внешних воздействующих факторов, определены основные коэффициенты в алгоритмах системы управления движения АНПА.

Организационно проект по созданию комплекса также стал инновационным для деятельности АО «ЦКБ МТ «Рубин». Впервые этапы работ в рамках ОКР предусматривали не только традиционно выполняемые бюро работы, такие как эскизный, технический и рабочие проекты, но и собственно изготовление и сборка АНПА в целом. Данные работы успешно были выполнены на производственных мощностях опытно-экспериментального производства АО «ЦКБ МТ «Рубин» и положили начало освоению бюро полного, сквозного цикла проектирования, изготовления и проведения испытаний сложных инновационных робототехнических комплексов.

Использование на всех стадиях создания АНПА технологии 3-D моделирования не только позволило существенно сократить время на разработку документации, но минимизировало ошибки при производстве составных частей АНПА и его деталей.

Рисунок 3 – Применение 3-D моделирования при изготовлении АНПА

В АО «ЦКБ МТ «Рубин» создаются также АНПА более легкого класса. Так в 2015 году на выставках вооружения и военной техники «Международный военно-морской салон» и «Армия» был представлен автономный необитаемый подводный аппарат «Юнона», разработанный и построенный ЦКБ МТ «Рубин», который может использоваться как для гражданских, так и для военных нужд.

Основная его особенность – мобильность, позволяющая осуществлять оперативное применение в требуемом районе. Аппарат предназначен для выполнения подводных поисковых и осмотровых работ, для поиска донных объектов, в том числе опасных или потенциально опасных, включая заиленные и занесенные слоем грунта, решения поисковых задач при обеспечении спасательных операций, картографирования, исследования топографии, определения рельефа дна, в том числе в условиях мелководья.

Автономный необитаемый подводный аппарат «Юнона» по ряду позиций превосходит имеющиеся прямые зарубежные аналоги, в частности: по дальности действия гидроакустической

станции навигационной безопасности и по ширине полосы поиска средствами гидролокатора бокового обзора.

Рисунок 4 – АНПА «Юнона»

В 2017 году был создан и также представлен на различных выставках АНПА «Амулет», предназначенный для выполнения демонстрационных, обследовательских и поисковых работ.

Аппарат создан с применением современных методов проектирования и изготовления – 3D моделирование, «открытая архитектура» программного обеспечения, применение широкодоступной общепромышленной комплектующей базы.

Управление аппаратом может осуществляться с любого мобильного устройства (смартфон, планшетный ПК).

Рисунок 5 – АНПА «Амулет»

Накопленный большой опыт в части создания робототехнических комплексов на своей территории позволяет создавать необитаемые аппараты и системы их управления, отвечающие

высоким требованиям и, зачастую, более высокого технического уровня, чем зарубежные аналоги. Выполнение полного цикла работ собственными силами позволяет добиться сокращения временных и материальных затрат, что является высоким конкурентоспособным фактором.

ЦКБ МТ «Рубин» планирует продолжить работы над аппаратами различных классов – малыми (мобильными), средними и тяжелыми, надводного и подводного базирования, автономными и телеуправляемыми.

Как и большинство мировых компаний, конструирующих подводные аппараты, ЦКБ МТ «Рубин» работает в интересах как Министерства обороны, так и нефтегазодобывающей отрасли.

Имеющийся в АО «ЦКБ МТ «Рубин» научно-технологический задел, большой опыт практической деятельности позволяют предлагать потенциальным заказчикам создание перспективных высокотехнологических роботизированных комплексов на базе разнородных необитаемых аппаратов. В дальней перспективе специалисты бюро наметили создание глобальной сети, состоящей из большого количества подводных глубоководных аппаратов, АНПА легкого класса, глайдеров, средств освещения подводной обстановки, БПЛА, средств связи и других компонентов, обеспечивающих проведение широкомасштабных научных и исследовательских миссий. Применение сетевых принципов создания сложных роботизированных комплексов, современных и перспективных технических решений, новых методов программирования и алгоритмизации позволят в будущем создавать системы, обеспечивающие навигацию, связь и управление разнородными роботизированными комплексами, действующими в глубинах Мирового океана, на морских просторах и в воздушном пространстве, позволят создавать единые центры управления необитаемыми подводными, надводными и воздушными аппаратами, представлять соответствующим организациям и ведомствам полную навигационную и техническую информацию в реальном времени.

В настоящее время АО «ЦКБ МТ «Рубин» принимает активное участие в формировании нормативной базы, которая должна обеспечивать применение единых принципов создания морской робототехники. В рамках созданного Росстандартом технического комитета 141 «Робототехника» АО «ЦКБ МТ «Рубин» ведет работу по созданию нормативной документации в тесной кооперации с основными предприятиями-разработчиками систем управления и РЭВ, обладающими наибольшими компетенциями в данной области.

Одной из задач подкомитета по морской робототехнике в рамках ТК-141 является создание нормативных документов, определяющих основные требования по созданию многофункциональных роботизированных комплексов. В настоящий момент указанная работа ведется в части создания нормативных документов по терминам и определениям в области морской робототехники, структуре и составу многофункциональных роботизированных комплексов и т.д.

В соответствии с планом развития АО «ЦКБ МТ «Рубин» ведет активные работы по расширению производственной и испытательной базы. В рамках плана инвестиционного развития приобретены крупные производственные площади на территории г. Кронштадт, на которых, после модернизации, будут организованы изготовление и испытания составных частей морских роботизированных комплексов. Наличие причального фронта и водной акватории позволят оптимизировать логистику процесса изготовления и испытаний различных технических средств и систем управления.

Конечной перспективой этого развития мы считаем формирование на базе ЦКБ МТ «Рубин» основного центра компетенций по созданию морской робототехники – высокотехнологичного технопарка создания, испытаний и серийного производства подводной робототехники.

V.K. Abrosimov[1], A.N. Mochalkin[1], E.I. Tatarenko[2]

MARINE ROBOTIZED COMPLEX FOR SOLVING PROBLEMS IN SITUATIONAL AWARENESS

[1] Software Engineering Company "Network-Centric Platforms", Limited Iiability/SEC "NCP"Ltd, Samara, Russia, avk787@yandex.ru
[2] OOO DB "Talisman", Samara, Russia comandor237@mail.ru

В.К. Абросимов[1], А.Н. Мочалкин[1], Е.И.Татаренко[2]

МОРСКОЙ РОБОТИЗИРОВАННЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ СИТУАЦИОННОЙ ОСВЕДОМЛЕННОСТИ В АКВАТОРИЯХ

[1] НПК «Сетецентрические платформы», г. Самара, avk787@yandex.ru
[2] ООО КБ «Талисман», г. Самара, comandor237@mail.ru

Аннотация

Рассматривается понятие ситуационной осведомленности применительно к выполнению миссий роботом или группой роботов в акваториях. Дана система ключевых определений, описаны источники и возможные подходы к наполнению информацией областей ситуационной осведомленности. Рассмотрены возможности нового робототехнического решения-глайдера с установленным на нем беспилотным летательным аппаратом-по решению задач мониторинга акваторий. Показано, что особые преимущества получаются при развертывании в акватории сети таких комплексов с реализацией сервисно-ориентированной архитектуры их взаимодействия и решении задач ситуауцитнной осведомленности на основе оркестровки сервисов, отражающих возможности роботов.

Ключевые слова: робот, глайдер, беспилотный летательный аппарат, акватория, событие, ситуация, ситуационная осведомленность, сервис-ориентированная архитектура.

Ситуационная осведомленность робота

В процессе решения роботом (или группой роботов) различных народно-хозяйственных и оборонных задач в недоопределенных средах могут происходить различные события и возникать непредвиденные ситуации. В силу влияния негативных (как пассивных, так и активных) факторов заранее согласованный план действий робота практически никогда не выполняется. Ошибки действий робота в ситуациях, причины возникновения которых глубоко скрыты и до конца не осознаны, могут иметь критический характер. Во всех случаях построения стратегий поведения робота или группы роботов необходимо получение информации о среде движения.

К числу новых научно-технических проблем, определяющих облик современных многоцелевых морских роботизированных средств относится «интеллектуализация» их функциональных свойств [1]. Степень автономности функционирования таких роботов в сложных средах определяется потенциальной возможностью самостоятельно действовать (наблюдать, оценивать, распознавать угрозу, принимать правильные решения и реализовывать их) в таких условиях. Понятно, что как для отдельного робота, так и для группы роботов, выполняющих общую коллективную миссию, необходимо формировать так называемую ситуационную осведомленность (по зарубежной терминологии – «situation awareness» [2,3]) в данном регионе акватории или подводного пространства.

С точки зрения семантики термин «ситуационная осведомленность» должен обязательно сопровождаться обстоятельствами времени и места. Обстоятельством места для этого термина является некоторая область пространства, в которой функционирует робот. Область ситуационной осведомленности в акватории, как на участке водной поверхности (или подводного пространства) ограниченном естественными, искусственными или условными границами, формируется как пространство, описываемое множеством фрагментов заданного объема и формы, существующих в четырехмерном измерении (три координаты и время). С обстоятельством времени связываются происшедшие, происходящие или будущие факты и явления, которые значимы для решения роботом или группой роботов задач.

К основным проблемам при использовании данных областей ситуационной осведомленности относится неопределенность при принятии решений, вызванная как недостатком информации, так и ее избыточностью. Во многом это связано с мало упоминаемым в литературе вопросом существенной зависимости информации ситуационной осведомленности от решаемой в среде задачи. Действительно, информация области ситуационной осведомленности воспринимается и используется роботами лишь в той мере, в которой она полезна для решения ими задач on-line, другая же информация рассматривается как избыточная. Именно поэтому нельзя говорить о состоянии области ситуационной осведомленности вообще, вне связи с решаемыми в среде задачами.

Очевидно, что для обеспечения высокой степени ситуационной осведомленности каждый робот должен определять, накапливать информацию, производить оценку ситуации и прогнозировать ее. Однако, в соответствии со своими ограниченными возможностями, он способен действовать лишь в своей узкой сфере ответственности.

Система определений

В акваториях морей и рек объективно возникают события и ситуации.

Под событием в акватории понимается реализация процесса в выбранном пространственном фрагменте акватории, связанного с проявлением прогнозируемого или ранее не учитываемого фактора. Наблюдаются как правило случайные события, возникающие извне (влияние внешней среды), так и события, генерируемые самим роботом вследствие его активных действий. Часто источник события остается недоопределенным, а его влияние на функционирование робота-критическим.

Под ситуацией в акватории понимается совокупность происшедших или происходящих событий в выбранном пространственном фрагменте акватории, в комплексе влияющих на результат функционирования робота и приводящих к необходимости принятия решения им (при автономном функционировании) либо управляющим им Оператором (при дистанционном управлении). Понятно, что ситуации в акваториях не являются независимыми. Основное отличие ситуации от события в том, что событие связано с единичным, как бы импульсным фактом (обнаруженным средствами наблюдения), а ситуация связана с возникновением в среде совокупности условий, требующих решения и действий.

Под прецедентом в акватории понимается ситуация в выбранном пространственном фрагменте акватории, возникшая в результате наступления совокупности событий, вызванных внешними факторами, по которой а) приняты соответствующие решения и б) известны последствия таких решений.

Под ситуационной осведомленностью робота будем понимать осуществляемый заблаговременно и/или параллельно с ее функционированием процесс накопления информации, систематизации событий и ситуаций, связанных с условиями и эффективностью функционирования робота в среде. Под областью ситуационной осведомленности будем понимать ограниченное пространство, разделенное на сколь угодно малое количество фрагментов, каждый из которых может быть описан координатами положения в области, размерами фрагмента и связанным с ним информационными матрицами, содержащими сведения относительно ситуации в данном фрагменте (история, текущее состояние, перспектива). Под состоянием области ситуационной осведомленности будем понимать а) полноту информации о каждом фрагменте области ситуационной осведомленности и б) полноту охвата информацией всех фрагментов области ситуационной осведомленности. Под моделью ситуационной осведомленности будем понимать формализованное представление области ситуационной осведомленности и методы, используемые для наполнения ее информацией и извлечения из нее знаний.

Два подхода к построению области ситуационной осведомленности

Принципиально возможны следующие два основных подхода к построению области ситуационной осведомленности.

В первом подходе вся область акватории которой осуществляется функционирование робота, максимально полно заблаговременно заполняется всей заранее имеющейся информацией, которая позже корректируется по результатам выполнения миссий. Такой подход является очень напряженным с точки зрения объемов и обновляемости информации, требует существенных ресурсов для своей реализации, может использоваться лишь для небольших акваторий, в которых маловероятно

возникновение событий, а возникающие ситуации по своему статусу являются типовыми и достаточно стабильными (акватория морского порта, подводная окрестность крупного моста через водную преграду, пространство вдоль берегов рек и др.).

Во втором подходе информация формируется лишь в тех фрагментах области информационной осведомленности, которые необходимы для выполнения коллективной миссии и/или требуются по условиям задачи мониторинга.

Необходимая информация для робота при решении задач в акваториях

Находясь в данном пространственном фрагменте, роботу необходима информация о состояниях водной поверхности, подводной среды и воздушного пространства по маршруту его следования при выполнении задач. В наиболее общем случае для пространственного фрагмента, описываемого формой, координатами центра и размерами, необходимо знание вероятности/возможности появления on-line или в перспективе событий и возникновения ситуаций. К числу основных событий относятся явления, затрудняющие движение робота и работу его систем, прежде всего технического зрения и систем получения информации, а также представляющие опасность для функционирования и активных действий робота. К числу основных ситуаций относятся совокупность событий, влияющих на качество выполнения миссии.

Очевидно, что все события и ситуации необходимо рассматривать в рамках концепции единого системного времени, согласно которому выстраивается шкала синхронизации системных процессов и событий внутри системы управления робота.

Источники информации для области ситуационной осведомленности

Современные роботы разрабатываются как многофункциональные, поэтому каждый робот может занимать и исполнять несколько ролей (лидер, связист, исследователь, логистик и др). У каждого робота есть система управления (CS-control system), система анализа окружающей обстановки («органы чувств» SES, например, система технического зрения), система исполнительных механизмов («органы движения"-SRM-System of robot moving) и, для функционирования в конфликтных средах, система активного воздействия на среду (AS-active system). К датчикам SES отнесем разнообразные технические средства-оптические, ультразвуковые, инфракрасные, лазерные и др., позволяющие получать информацию о среде. Датчиками SRM являются датчики исполнительных механизмов, активизирующих функции движения робота: перемещение, маневр, остановку и др. Система AS воздействует на источник угрозы со стороны среды, снижая тем самым опасность нахождения робота в заданной области пространства.

К источникам информации можно также отнести и информацию, поступающую от внешних систем, сопровождающих функционирование робота в акваториях-космических средств, кораблей сопровождения, заблаговременно размещаемые в акватории информационные средства (гидроакустические буи), береговые средства наблюдения.

При функционировании робота в акватории могут возникать такие явления, как «разрыв ситуационной осведомленности» и «импульс ситуационной осведомленности». Разрыв SA происходит в результате ограничения или даже потери связи и, соответственно, взаимодействия между роботом и ресурсом, на котором размещается облако ситуационной осведомленности. При высокой степени ситуационной осведомленности робот может некоторое время функционировать автономно. Однако при длительной автономной работе накапливаемая недоопределенность может привести к опасным ошибкам. Импульс ситуационной осведомленности связан с событиями, когда ранее отсутствующая информация вдруг обнаруживается некоторыми средствами наблюдения.

Морской роботизированный комплекс "Глайдерон"

Авторами спроектирован в настоящее время беспилотный дистанционно-управляемый полуавтономный авиационно-морской робот. Такой робот объединяет функционал подводных, надводных и авиационных беспилотных средств для решения широкого класса народнохозяйственных и специальных задач на морских акваториях и в прибрежных зонах. В частности одной из его важных миссий является наполнение информацией области ситуационной осведомленности.

Глайдеры широко применяются в мировой практике для океанографии, исследования течений и мониторинга окружающей среды. По сравнению с обыкновенными автономными необитаемыми аппаратами, глайдеры обладают более низкой стоимостью, способностью перемещаться на большие

расстояния, а продолжительность времени их непрерывной работы может достигать нескольких месяцев.

Разрабатываемое решение представляет собой объединение в единую модульную конструкцию роботов различного типа и различной функциональности и получения на этой основе синергетического эффекта совместного использования морских и воздушных объектов управления в задачах мониторинга акватории для решения задачи ситуационной осведомленности. Комплекс получил условное название «глайдерон» (глайдер+дрон). И глайдер и БПЛА выступают в роли источников информации для области ситуационной осведомленности. Глайдерон является беспилотным. Два основных модуля робота – глайдер и БПЛА – управляются дистанционно Оператором в пределах зоны радиовидимости и автономно при выходе из зоны радиовидимости по заранее рассчитанным глайд-морскому заданию для глайдера и полетным заданиям для БПЛА.

На глайдере могут устанавливаться разнообразная сменная полезная нагрузка-средства для получения информации о событиях и ситуациях, в том числе гидролокаторы прямого и бокового обзора, акустические модемы и датчики обнаружения предметов и животных, разнообразные сенсоры и датчики и др.

Наличие в составе глайдерона БПЛА с разнообразными элементами технического зрения и анализа окружающей среды (при незначительной полезной нагрузке – видео и фото аппаратура, при расширенных характеристиках по весу – более тяжелая полезная нагрузка: тепловизор, магнитометр, газоанализатор и др.) позволяет получать требуемые по постановке задачи мониторинга данные ситуационной осведомленности в воздушной среде, в ближнем надводном слое, на поверхности акватории, а также в окрестности прибрежной зоны.

Существенное преимущество в части наполнения области ситуационной осведомленности объективной информацией можно получить при объединении нескольких глайдеронов, оснащенных различной полезной нагрузкой, в сеть с реализацией сервисно-ориентированной архитектуры их взаимодействия. При этом стратегию заполнения области ситуационной осведомленности группой предлагается строить на основе оркестровки сервисов разнообразных глайдеронов. Оркестровка сервисов заключается в том, что каждый элемент каждого Глайдерона, решая собственную задачу в интересах выполнения коллективной миссии, может через Оркестратора (в качестве Оркестратора можно назначить одного из глайдеронов, назначив ему роль связиста) запросить и использовать функциональные, информационные и активные сервисы других глайдеронов как для информационного обеспечения, так для активных действий в среде. Все взаимодействия будут осуществляться по схеме «запрос-ответ» с использованием стандартных протоколов обмена информацией.

При этом охват зоны мониторинга с получением данных ситуационной осведомленности существенно расширяется за счет многократного увеличения площади поверхности мониторинга при чередовании циклов "движение глайдера-полет БПЛА", а также расширения при необходимости территориально распределенной сети добывания информации с задействованием как космических средств связи и наблюдения, так и других источников информации, размещаемых в данном участке акватории, вновь использую принципы сервис-ориентированной архитектуры.

1. Ю.В. Матвиенко, А.В. Инзарцев, Л.В. Киселев, А.Ф. Щербатюк., Перспективы повышения эффективности автономных подводных роботов, Известия ЮФУ. Технические науки, 2016, т.1 (174), с.123-141.
2. Endsley M.R. Toward a theory of situation awareness in dynamic systems // Human Factors. 1995, Vol. 37. № 1. pp. 32—64.
3. Cheng S., Gang F., Yuan F., Yong W., Decentralized adaptive awareness coverage control for multi-agent networks, Automatica, 2011, vol.47, pp. 2749–2756.

D.A. Gromoshinskii, A.V. Popov

DETECTING METAL-CONTAINING OBJECTS WITH FERROMAGNETIC SENSORS MOUNTED ON UNMANNED UNDERWATER VEHICLE

RTC, Saint-Petersburg, d.gromoshinskiy@rtc.ru, apopov@rtc.ru

Abstract

For the repair or replacement of submarine infrastructure passing along the bottom, there are tasks of their detection and assessment of their length. To solve the problems of detection of metal-containing objects (pipelines, etc.), there are two main detection principles: active and passive. For an active detection method, additional energy is required to radiate a signal into the space. In this case, the active principle of detection is characterized by resistance to external sources of magnetic fields (natural and created by the UUV). Unlike the active the passive principle requires compensation of the effect of external magnetic fields, which can have a significant effect on the sensors readings.

To search for metal-containing objects it is proposed to use two three-component ferromagnetic sensors, which can be mounted on the UUV. Both sensors use a passive detection principle. The presence of two sensors spaced from each other by a known distance makes it possible to calculate the gradient of the magnetic induction vector by subtracting the readings of one sensor from another.

Calculation of the gradient makes it possible to compensate for the effect of external magnetic fields, the effect of which on each of the sensors is the same. During the intersection of a metal-containing object, at first the effect from it is carried out on the first sensor, and then on the second in the direction of the UUV motion. This gives a characteristic picture of the signal of the vector of magnetic induction - the alternation of the maximum and minimum (minimum and maximum) of the gradient of any of the components of the sensors. The presence of this gradient behavior is a necessary for detection. To prevent false positives, filters based on the use of readings from position sensors, speed and orientation of the navigation system are used. To compensate for the external magnetic fields created by the vehicle motors, data from the sensors for measuring the speed of rotation of the motors are used, taking into account the electromagnetic portrait of the medium received in advance.

Key words: detecting metal-containing objects, ferromagnetic sensors, unmanned underwater vehicle.

Д.А. Громошинский А.В. Попов

ОБНАРУЖЕНИЕ МЕТАЛЛОСОДЕРЖАЩИХ ОБЪЕКТОВ С ПОМОЩЬЮ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ЗОНДОВ, УСТАНОВЛЕННЫХ НА НЕОБИТАЕМОМ ПОДВОДНОМ АППАРАТЕ

ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург
d.gromoshinskiy@rtc.ru, apopov@rtc.ru

Аннотация

Для проведения работ по ремонту или замене проходящих по дну объектов подводной инфраструктуры возникают задачи их обнаружения и оценки их протяженности. Для решения задач обнаружения металлосодержащих объектов (трубопроводы и т.п.) существуют два основных принципа обнаружения: активный и пассивный. Для активного метода обнаружения необходимы дополнительные затраты энергии на излучение сигнала в исследуемое пространство. При этом для активного принципа обнаружения характерна устойчивость к внешним источникам магнитных полей, естественных и создаваемых носителем магнитного датчика. В отличие от активного пассивный принцип требует компенсации воздействия внешних магнитных полей, которые могут оказывать существенное влияние на показания зондов.

Для поиска металлосодержащих объектов предлагается использовать два трехкомпонентных ферромагнитных зонда, которые могут быть установленных на носителе (АНПА, ТНПА). При этом оба зонда используют пассивный принцип обнаружения. Наличие двух зондов, разнесенных друг относительно друга на известное расстояние, позволяет рассчитать градиент вектора магнитной индукции, путем вычитания показаний одного зонда из другого.

Расчет градиента позволяет компенсировать влияние внешних магнитных полей, воздействие которых на каждый из датчиков одинаково. При пересечении металлосодержащего объекта воздействие с его стороны осуществляется сначала на первый датчик, а затем на второй по ходу движения носителя. При этом получается характерная картина сигнала вектора магнитной индукции – чередование максимума и минимума (минимума и максимума) градиента какого-либо из компонент зондов. Наличие данного поведения градиента является необходимым условием для обнаружения. С целью исключения ложных срабатываний используются фильтры, основанные на использовании показаний с датчиков положения, скорости и ориентации навигационной системы. Для компенсации внешних магнитных полей, создаваемых двигателями носителя, используются данные с датчиков измерения скорости вращения двигателей с учетом полученного заранее электромагнитного портрета носителя.

Ключевые слова: обнаружение протяженных металлосодержащих объектов, ферромагнитный зонд, необитаемый подводный аппарат.

В основе алгоритма обнаружения протяженного металлосодержащего объекта лежит алгоритм обнаружения пересечения протяженного металлосодержащего объекта, результатом которого будет являться сигнал о пересечении протяженного объекта. Таким образом, всякое обнаружение протяженного металлосодержащего объекта будет выполняться через обнаружение его пересечения с носителем.

На рисунке 1 изображена блок-схема алгоритма обнаружения пересечения протяженных металлосодержащих объектов.

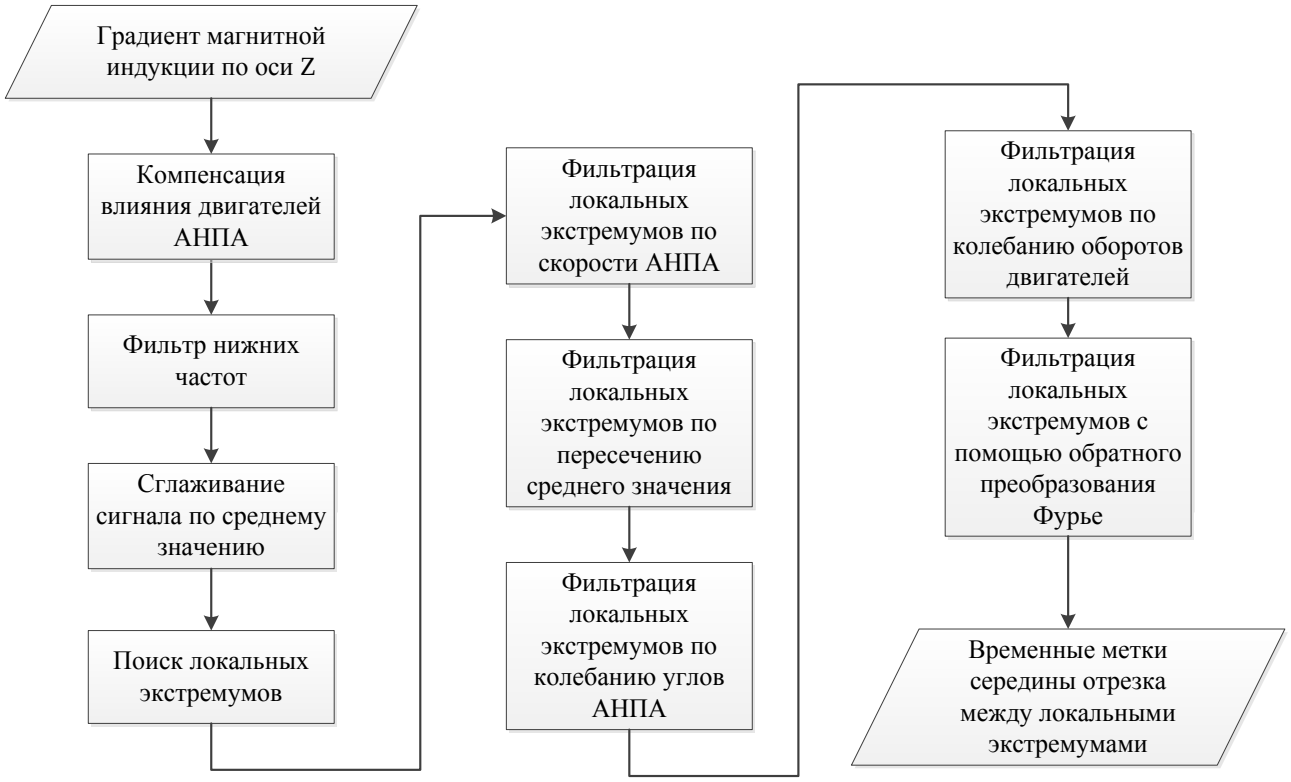


Рисунок 1 – Блок-схема алгоритма обнаружения пересечения протяженных металлосодержащих объектов

По результатам экспериментов в качестве входного сигнала для алгоритма был выбран градиент вектора магнитной индукции по оси Z, как наиболее устойчивый к помехам различного рода.

Для компенсации влияния двигателей на показания датчиков снимаются зависимости градиента по оси Z от числа оборотов различных двигателей. Для описания большинства полученных зависимостей наиболее подходящей является экспоненциальная зависимость (формула 1):

$$y(x) = ae^{bx}. \quad (1)$$

На рисунке 2 изображен пример графика зависимости градиента по оси Z от оборотов одного из двигателей (верхний график). На нижнем графике, (поверх исходной кривой) красным изображена интерполирующая данную зависимость кривая.

Для устранения влияния двигателей на градиент по оси Z была предложена схема на основе использования полученной интерполяционной кривой зависимости градиента по оси Z от числа оборотов двигателя. Для каждого полученного текущего показания градиента по оси Z берется соответствующее текущему моменту времени значение числа оборотов каждого из двигателей. Для каждого из двигателей по полученным ранее интерполяционным кривым вычисляется значение градиента по оси Z, соответствующее текущему значению числа их оборотов. Каждое из полученных значений градиента (полученных на основе интерполяционных кривых) прибавляется (с учетом знака) к текущему значению градиента по оси Z, соответствующее его текущему положению.

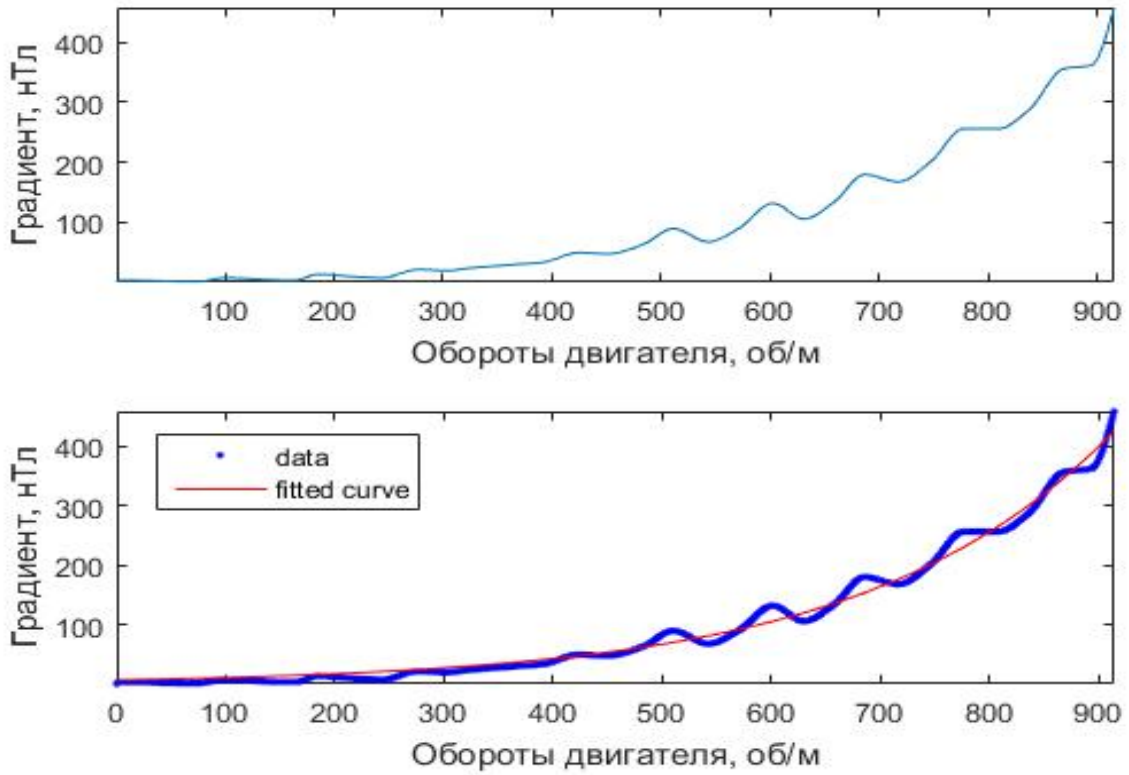


Рисунок 2 – График зависимости градиента по оси Z от оборотов одного из двигателей, а также интерполирующая данную зависимость кривая (изображена поверх исходной кривой на нижнем графике)

На рисунке 3 показаны графики градиента по оси Z (в зависимости от времени) с коррекцией и без коррекции влияния двигателей. Видно, что были устранены некоторые скачки сигнала, связанные с резким повышением оборотов двигателей.

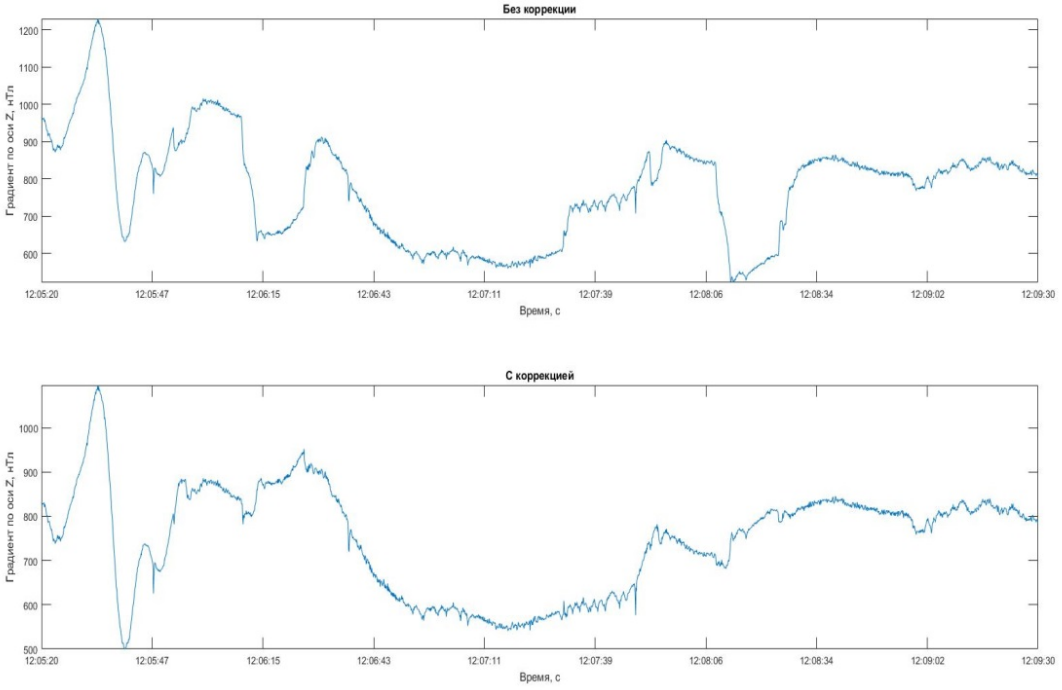
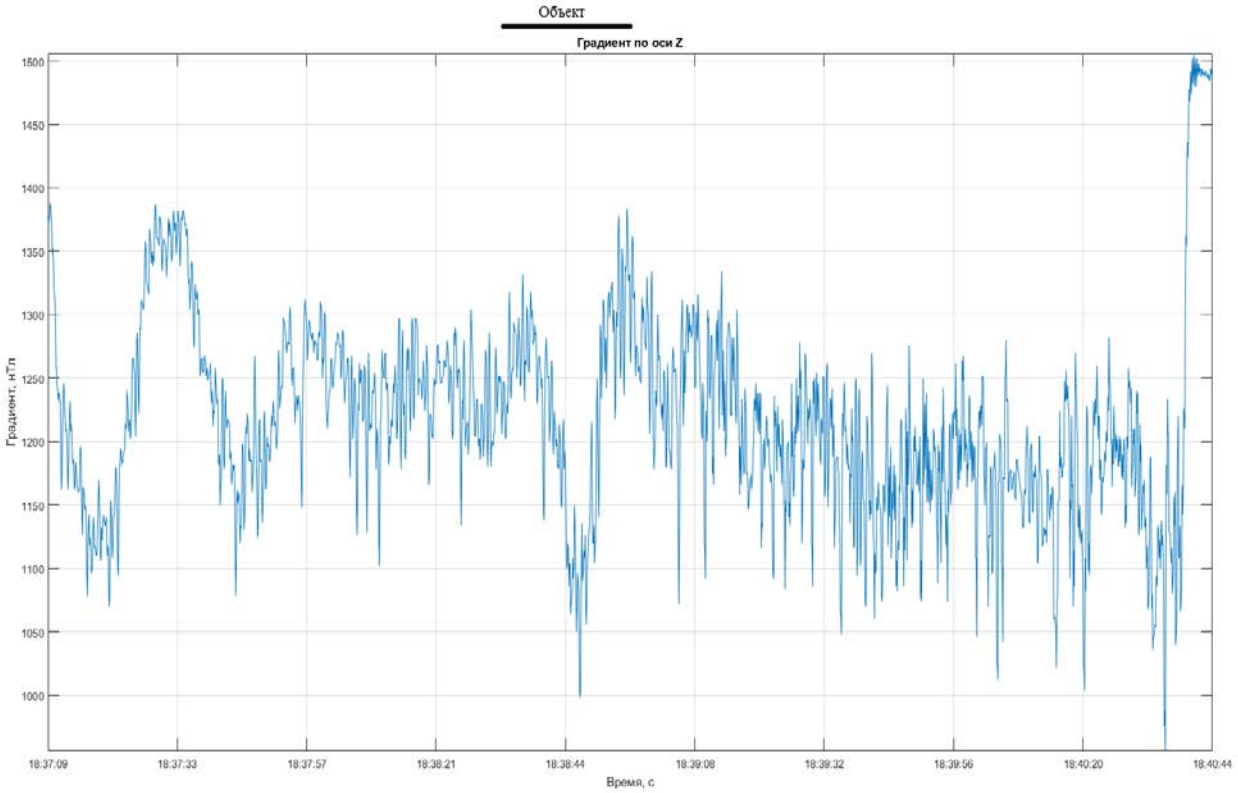
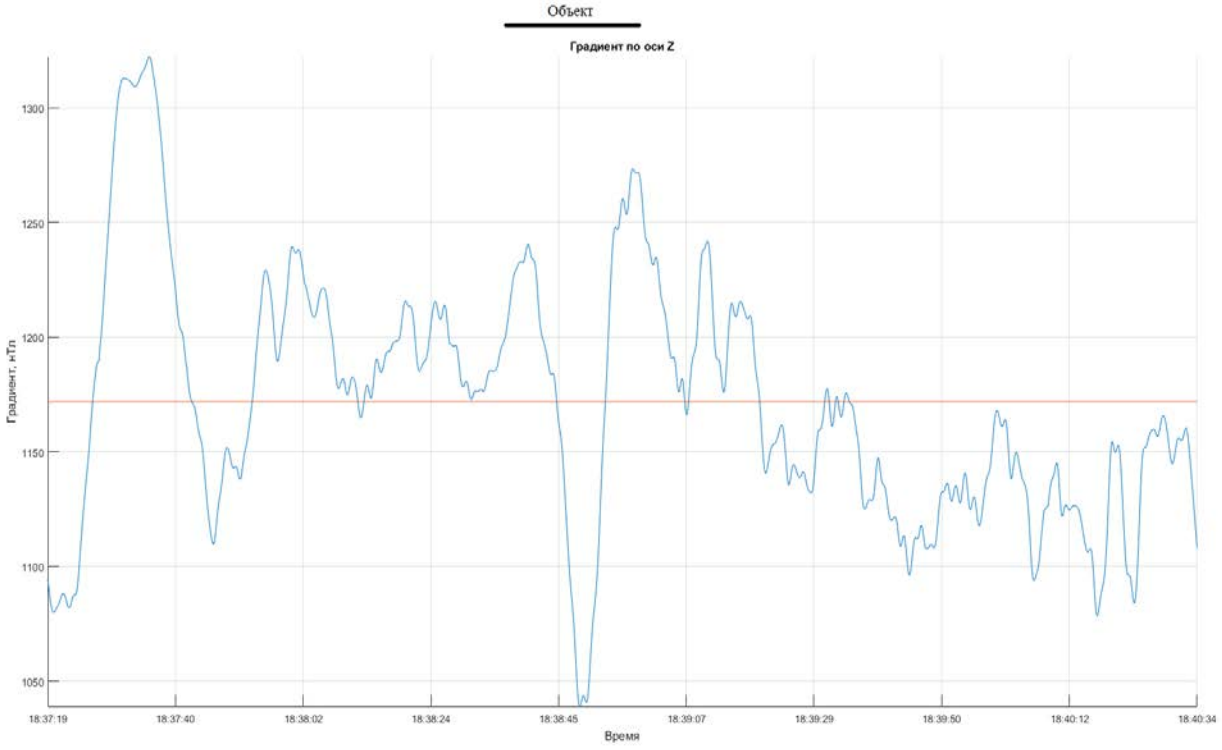


Рисунок 3 – Графики градиента по оси Z (в зависимости от времени) без коррекции и с коррекцией влияния двигателей (нижний график)

Для предварительной обработки сигнала используется фильтр нижних частот, а также сглаживание по среднему значению. Результаты до и после предварительной обработки градиента магнитной индукции по оси Z показаны на рисунке 4. По оси абсцисс представлено время, по оси ординат – значение градиента магнитной индукции по оси Z. Значение градиента магнитной индукции в проекции на определенную ось получается путем вычитания показаний носового и кормового феррозондов в проекции на соответствующую ось.



а)



б)

Рисунок 4 – Результаты до и после предварительной обработки градиента вектора магнитной индукции по оси Z (а) – до предварительной обработки, б) – после предварительной обработки)

После этапа предобработки градиента по оси Z производится поиск локальных экстремумов, полученного сигнала. Фильтрация локальных экстремумов производится по ширине пиков (впадин), которые они образуют. На рисунке 5 изображен результат поиска локальных экстремумов градиента вектора магнитной индукции по оси Z. По оси абсцисс представлено время, а по оси ординат –

градиент вектора магнитной индукции по оси Z. Красными кружочками на графике отмечены локальные максимумы, а синими - локальные минимумы.

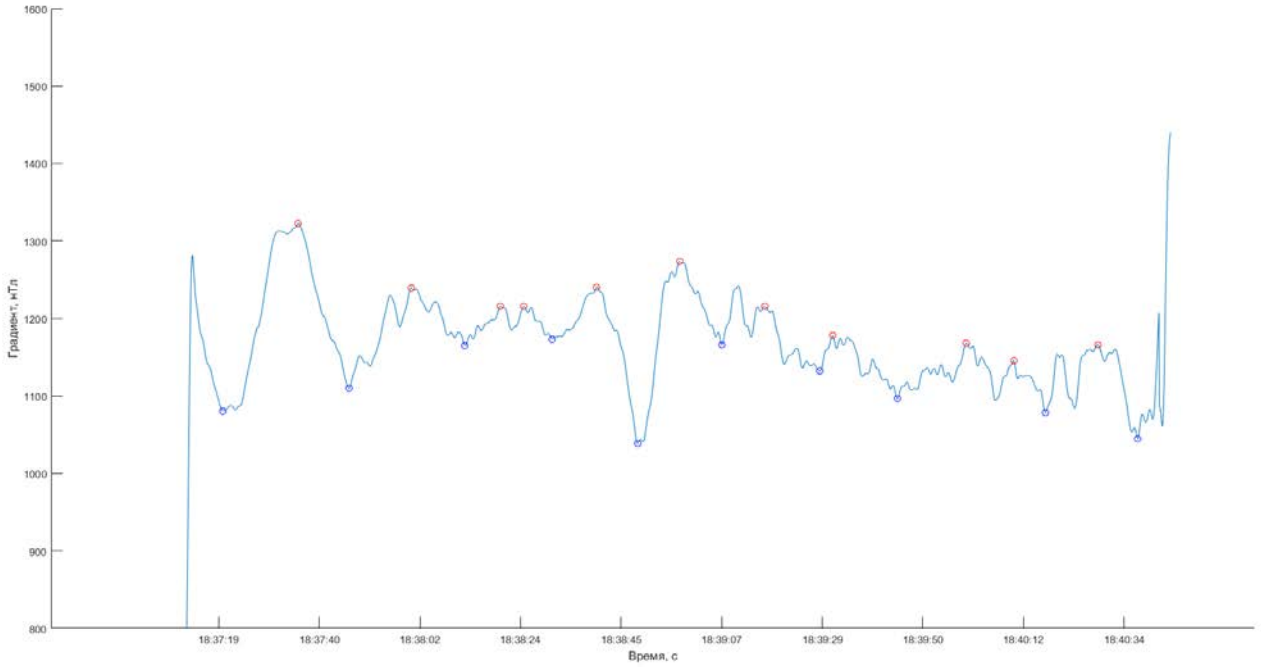


Рисунок 17 – Результат поиска локальных экстремумов

По результатам проведения экспериментов по регистрации отклика феррозондов на пересечение металлосодержащего объекта было обнаружено, что данный отклик представляет собой последовательность из двух экстремумов (максимума и минимума, либо наоборот). Для определения наличия объекта был выбран градиент по оси Z, как наиболее не чувствительный к изменениям ориентации и оборотов двигателей. На рисунке 6 изображен график градиента вектора магнитной индукции по оси Z с выделенным интервалом времени (выделен черным подчеркиванием над графиком), соответствующий наличию металлосодержащего объекта. По оси абсцисс представлено время, а по оси ординат – градиент вектора магнитной индукции по оси Z. При этом точка минимума соответствует прохождению носового феррозонда над протяженным объектом, а точка максимума соответствует прохождению комового феррозонда.

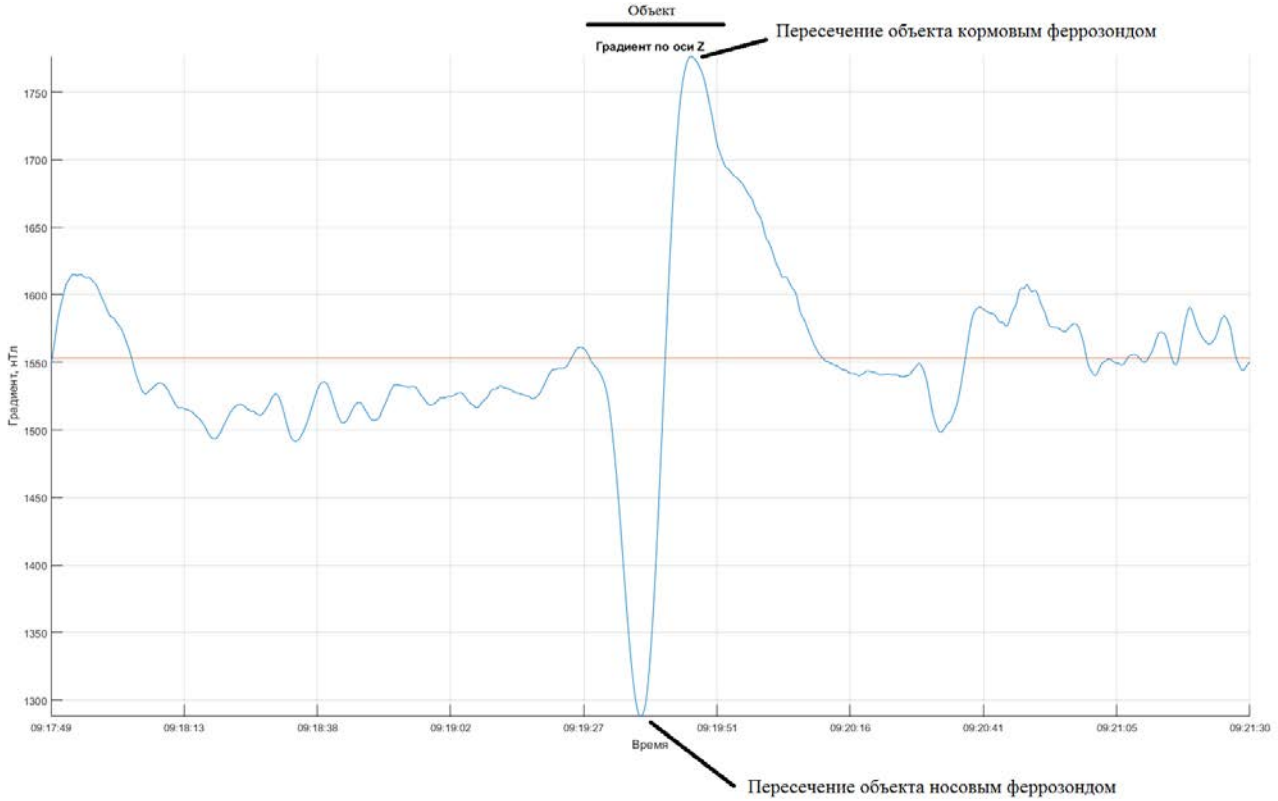


Рисунок 6 – График градиента вектора магнитной индукции по оси Z с выделенным интервалом времени, соответствующего пересечению металлосодержащего протяженного объекта

Для фильтрации такой последовательности экстремумов предполагается, что отрезок времени между ними должен быть примерно равен скорости движения (предполагается, что она постоянна) умноженной на расстояние между носовым и кормовым феррозондами.

Для фильтрации по пересечению среднего значения градиента по оси Z берется аналогичная пара точек, описанная ранее. Для каждой такой пары точек происходит проверка на пересечение линии среднего значения градиента линией, соединяющей эту пару точек. Пара точек, для которых не выполняется данное условие, отсеивается.

Для фильтрации локальных экстремумов также используются данные об изменении ориентации носителя. На рисунке 7 подчеркиванием отмечено влияние значительного изменения (поворот на 180 градусов) угла курса на градиент вектора магнитной индукции по оси Z, представленного на верхнем графике. По оси абсцисс представлено время, по оси ординат для верхнего графика – значение градиента вектора магнитной индукции по оси Z, а для нижних 3 графиков – значения углов в градусах. Для каждой пары точек, прошедшей предыдущие фильтрации, оценивается изменение ориентации на временном интервале между двумя данными точками. Если изменение какого-либо из углов выходит за пределы заданного порога, то данная пара точек исключается из рассмотрения.

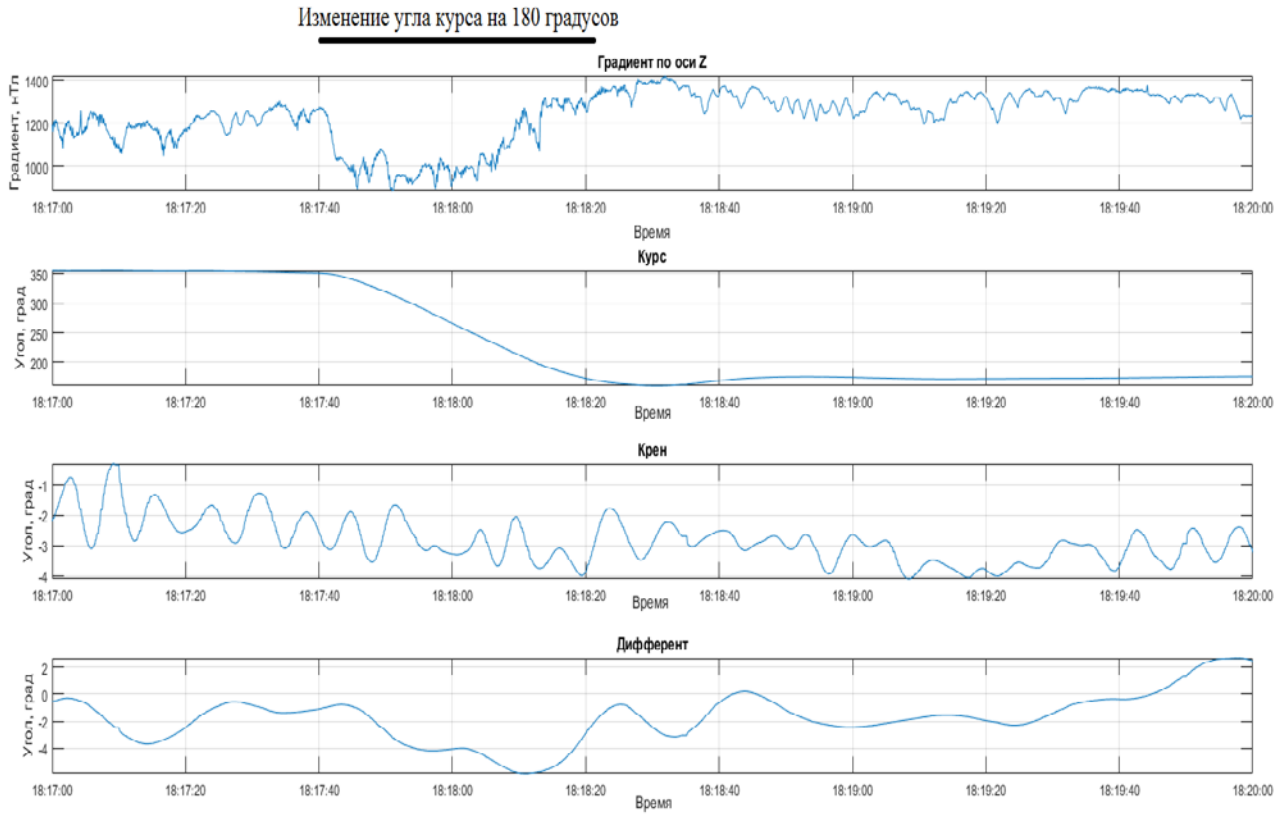
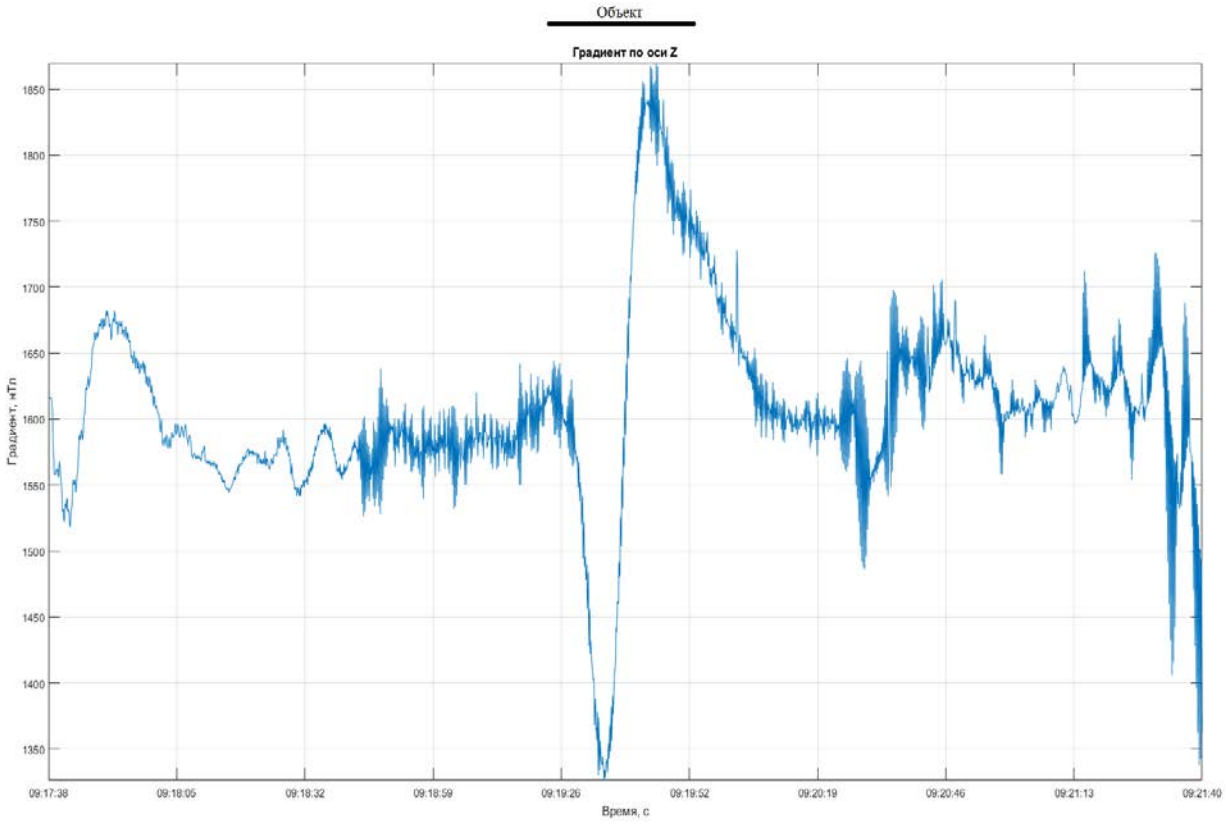
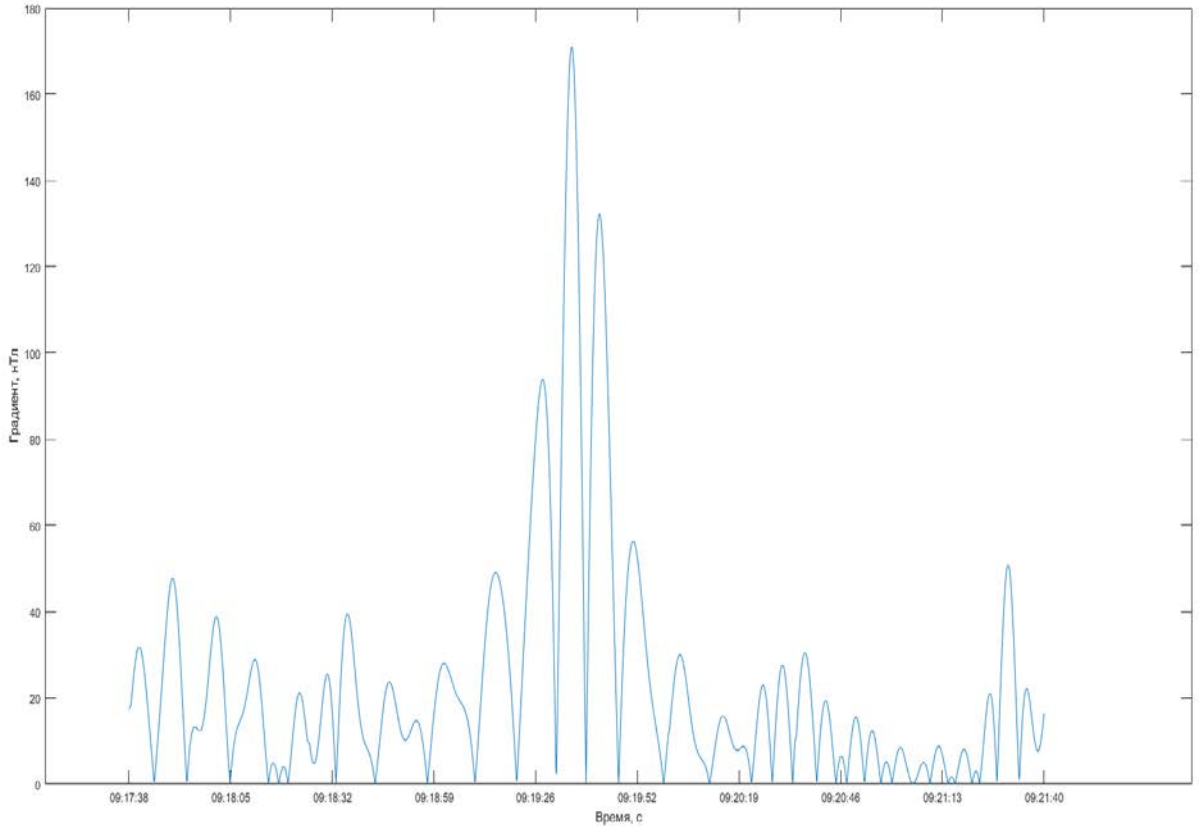


Рисунок 7 – Влияние изменения угла курса на вектор магнитной индукции по оси Z

Для фильтрации локальных экстремумов с помощью обратного преобразования Фурье используется алгоритм быстрого преобразования Фурье. На вход алгоритма подается градиент вектора магнитной индукции по оси Z. Для полученного частотного спектра сигнала выбираются пороги для обрезания нижних и верхних частот. Далее для обрезанного частотного спектра берется обратное преобразование Фурье. На рисунке 8 а) показан исходный сигнал, а на рисунке 8 б) показан результат вычисления модуля обратного преобразования Фурье для обрезанного частотного спектра исходного сигнала. По оси абсцисс представлено время, по оси ординат – градиент вектора магнитной индукции по оси Z. Для полученного сигнала производится поиск локальных максимумов. Полученные локальные максимумы сравниваются с порогом. Из соседних локальных максимумов, прошедших пороговую фильтрацию, составляются отрезки. На рисунке 9 цифрами обозначены локальные максимумы, прошедшие пороговую фильтрацию. По оси абсцисс представлено время, по оси ординат – градиент вектора магнитной индукции по оси Z. Далее проверяется попадания пар точек, прошедших предыдущие фильтрации, в полученные отрезки. Если хотя бы одна точка из такой пары попадает в какой-либо из отрезков, то данная пара экстремумов проходит данную фильтрацию.



а)



б)

Рисунок 8 – Модуль обратного преобразования Фурье (а) – исходный сигнал, б) – модуль обратного преобразования Фурье для обрезанного спектра исходного сигнала)

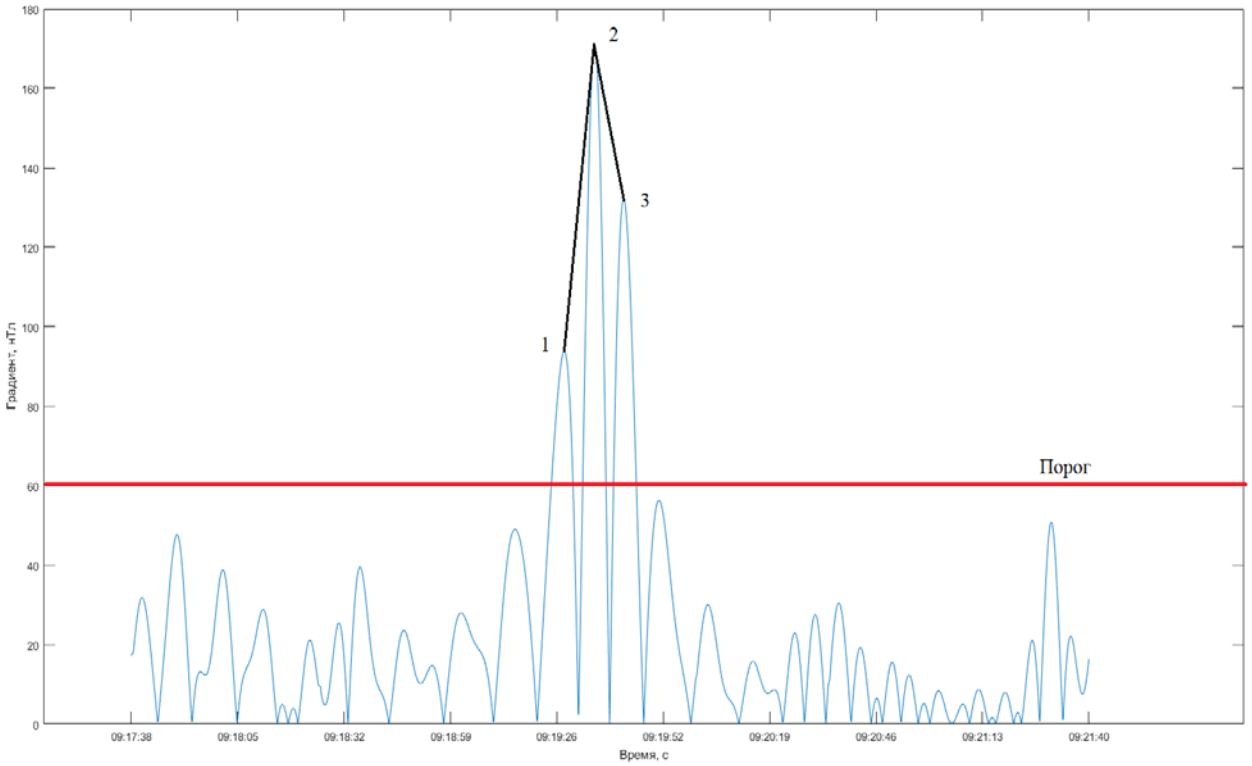
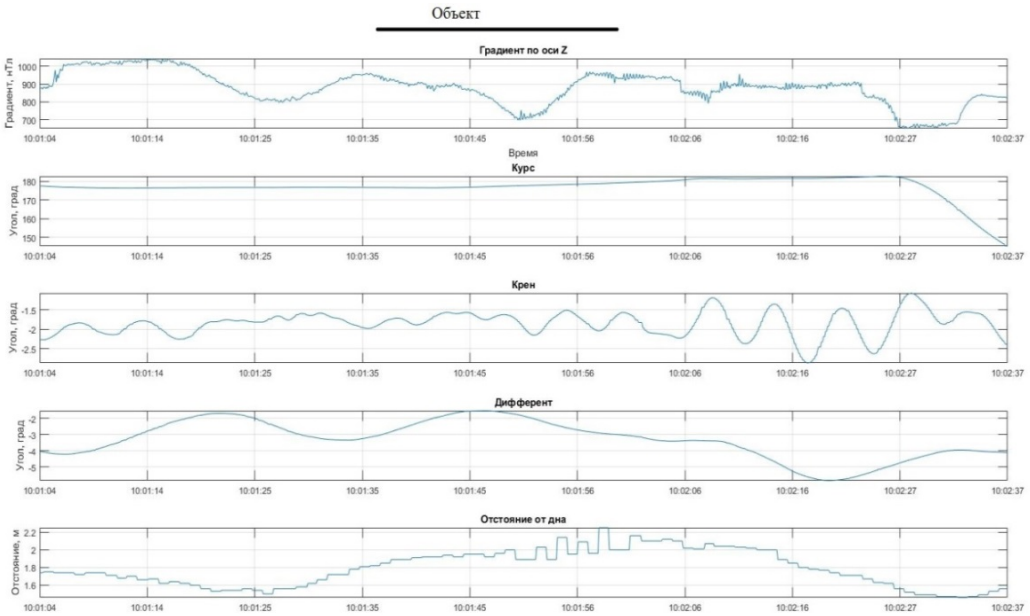


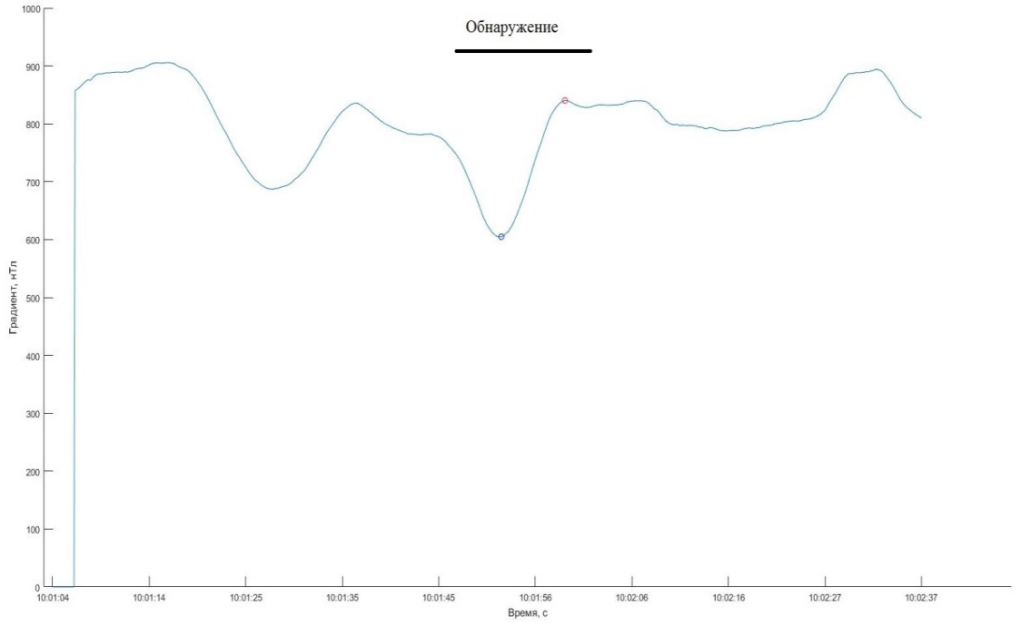
Рисунок 9 – Локальные максимумы, прошедшие пороговую фильтрацию

Выходными данными алгоритма обнаружения протяженного объекта являются временные метки середин отрезков между прошедшими все этапы фильтрации локальными экстремумами.

На рисунке 10 показан эксперимент с проходом над трубой. При этом на рисунке 10 а) приведены графики градиента вектора магнитной индукции по оси Z, углов курса, крена и дифферента и отстояния от дна в зависимости от времени. На рисунке 10б) приведен график градиента вектора магнитной индукции по оси Z в зависимости от времени с отметкой экстремумов, между которыми был обнаружен объект.



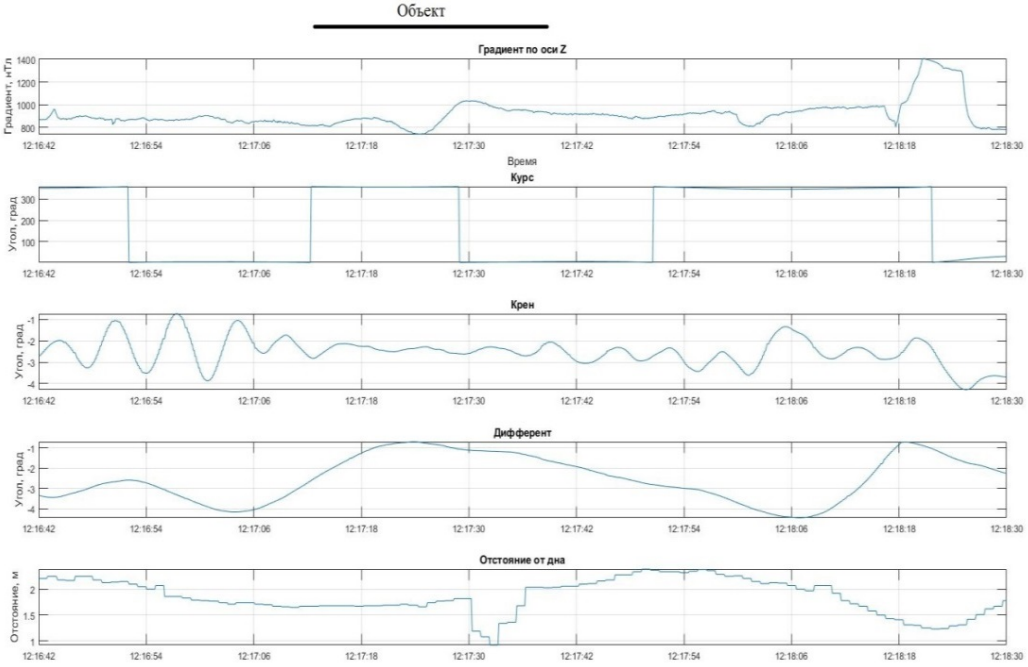
а)



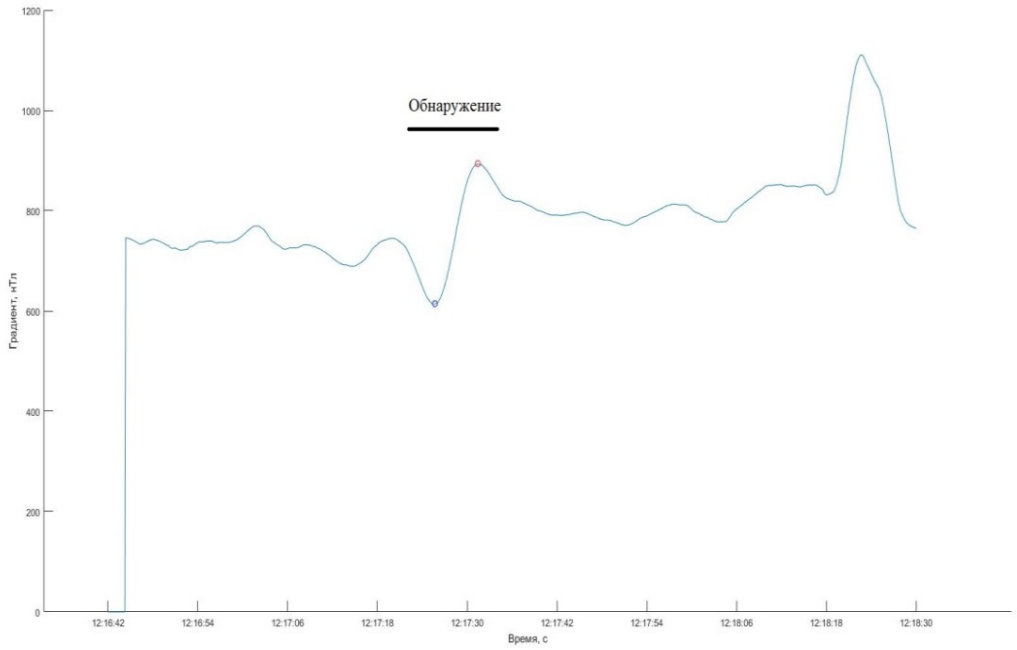
б)

Рисунок 10 – Эксперимент с проходом над трубой (а) – график градиент по оси Z, углов курса, крена и дифферента, отстояние от дна, б) – обнаружение объекта)

На рисунке 11 показан аналогичный предыдущему эксперимент. При этом на рисунке 11 а) приведены графики градиента вектора магнитной индукции по оси Z, углов курса, крена и дифферента и отстояния от дна в зависимости от времени. На рисунке 11 б) приведен график градиента вектора магнитной индукции по оси Z в зависимости от времени с отметкой экстремумов, между которыми был обнаружен объект.



а)



б)

Рисунок 11 – Эксперимент с проходом над трубой (а) – график градиент по оси Z, углов курса, крена и дифферента, отстояние от дна, б) – обнаружение объекта)

N.A. Shchur [1], D.A. Vokhmintcev [2,3]

AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLES HYDRODYNAMIC INSTABILITY

[1]*Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, St.Petersburg, Russia, koliambos@mail.ru*
[2]*RTC, St.Petersburg, Russia*
[3]*NRC «Kurchatov Institute» - PNPI, Gatchina, Russia*

Abstract

The paper is concerned with describes of hydrodynamic instabilities phenomena, emerging from autonomous underwater vehicles (AUV) maneuvers, and investigated in the process of numerical hydrodynamic modeling, carried out in design problems of automata control system development. In the course of parametric calculations for available AUV tail-plane design, it was shown that movement on course is unstable due to the course momentum, fundamental instability due to the turning momentum. Also are given estimates of the dependence of the magnitude of the course momentum on the course angle of attack, suggested recommendations for modification of this AUV body design.

Key words: Autonomous Underwater Vehicles, AUV Modeling, Parameter Estimation, Computational Fluid Dynamics.

Н.А. Щур [1], Д.А. Вохминцев [2,3]

ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ АВТОНОМНОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА

[1]*СПбПУ Петра Великого, Санкт-Петербург, Россиия, koliambos@mail.ru*
[2] *ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург*
[3]*НИЦ «Курчатовский институт – ПИЯФ», Гатчина, Россия*

Аннотация

В предложенной работе, на примере автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА) конкретной конструкции (с крестообразным хвостовым оперением), рассмотрены явления гидродинамической неустойчивости, возникающие при маневрировании АНПА и исследованные с помощью численного гидродинамического моделирования методом конечного объема. По результатам параметрических расчетов были изучены неустойчивость из-за курсового момента, принципиальную неустойчивость из-за разворачивающего момента, а также приведена оценка зависимости величины курсовой компонента момента гидродинамических сил от курсового угла атаки АНПА. По результатам расчетов даны рекомендации по модификации корпуса АНПА, указаны величины, обязательные для учета при проектировании автоматических систем управления АНПА.

Ключевые слова: Автономные необитаемые подводные аппараты, моделирование АНПА, вычислительная гидродинамика.

При натурных испытаниях некоторых образцов автономных подводных аппаратов возникают трудности с настройкой системы управления, позволяющей стабильно удерживать аппарат на заданном курсе из-за различных эффектов гидродинамической неустойчивости [1]. Зачастую они проявляются как «виляние» аппарата вдоль заданного курса (см. рис. 1). Исходя из опыта конструирования подобного рода аппаратов, можно предположить, что фундаментальными причинами наблюдаемых явлений неустойчивости является наличие положительной обратной связи между компонентами гидродинамических сил и моментов, действующих на аппарат, и углами курса, дифферента или крена. Данная работа посвящена исследованию зависимости между курсовой компонентой момента гидродинамических сил и курсовым углом атаки (см. рис. 2) с помощью численного гидродинамического моделирования методом конечного объема для тела, обтекаемого жидкостью [2], с заданными величиной и направлением скорости (покомпонентно).

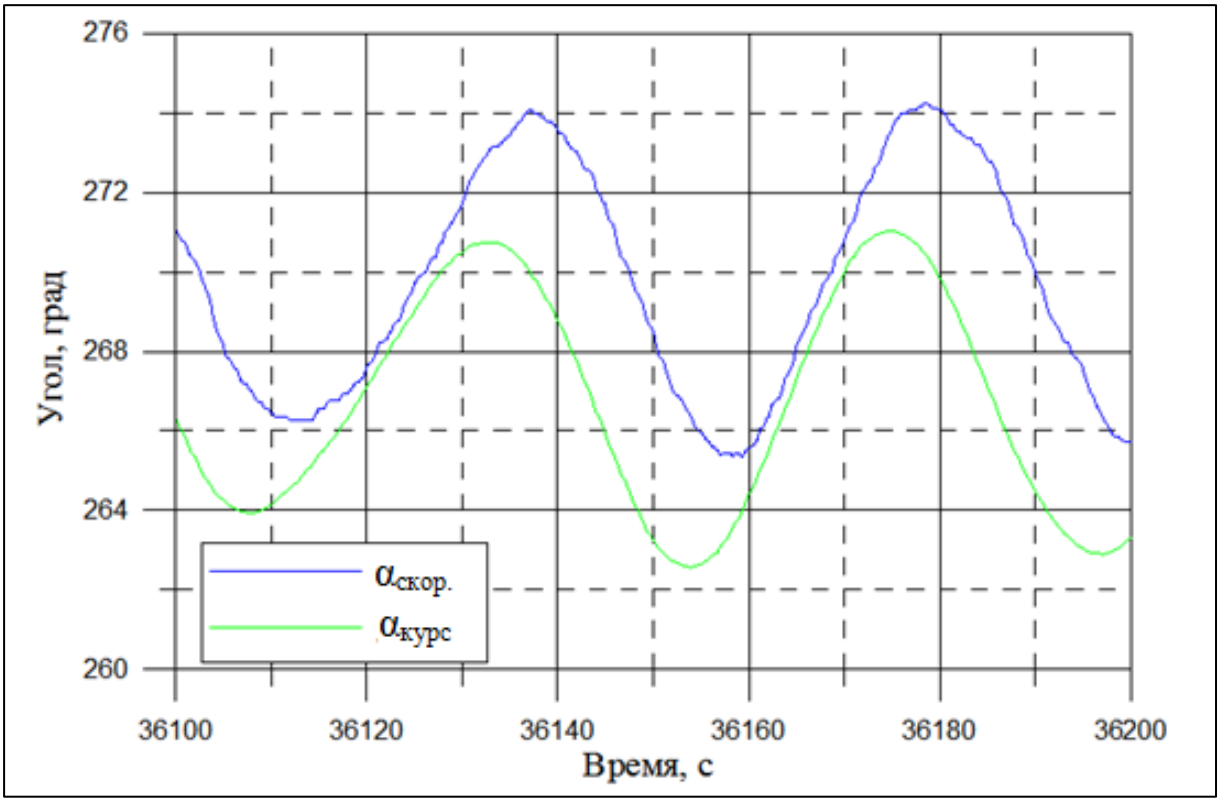


Рисунок 1 – Колебания курсового угла и угла направления скорости, полученные при обработке данных с датчиков АНПА

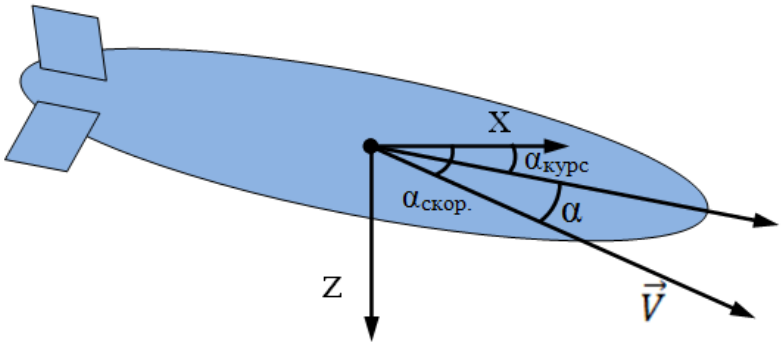


Рисунок 2 – Схема движения аппарата при наличии угла атаки: α – курсовой угол атаки

На рис. 3 показано колебание угла атаки, полученные после обработки данных с датчиков, которые были записаны в реальном натурном эксперименте. Если считать, что величины, записанные с датчиков, измерены с достаточной точностью, то диапазон варьирования углов атаки можно определить как ±10º.

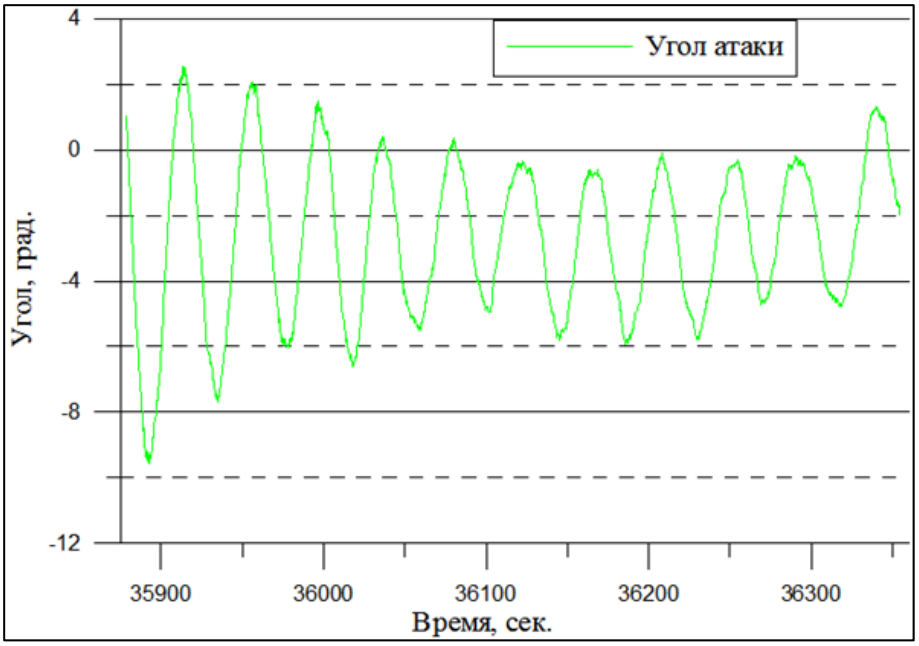


Рисунок 3 – Колебания курсового угла атаки, полученные при обработке данных с датчиков АНПА

Постановка задачи

Задача моделирования динамики движения автономного подводного аппарата решается в системе координат, связанной с самим аппаратом. В этом случае, моделируется обтекание аппарата потоком вязкой несжимаемой жидкости (водой). Задача решается в RANS [3, 5] постановке, для замыкания уравнений используется двухпараметрическая k-ω модель турбулентности Menter SST [4].

Изменение угла атаки в серии параметрических расчетов варьируется за счет задания соответствующих компонент скорости на входном граничном условии (на рис.4 выделено красным, граничное условие 1). При этом продольная скорость аппарата постоянна, и равна 0.623 м/с, что соответствует средней по времени скорости, полученной из протоколов данных с датчиков АНПА.

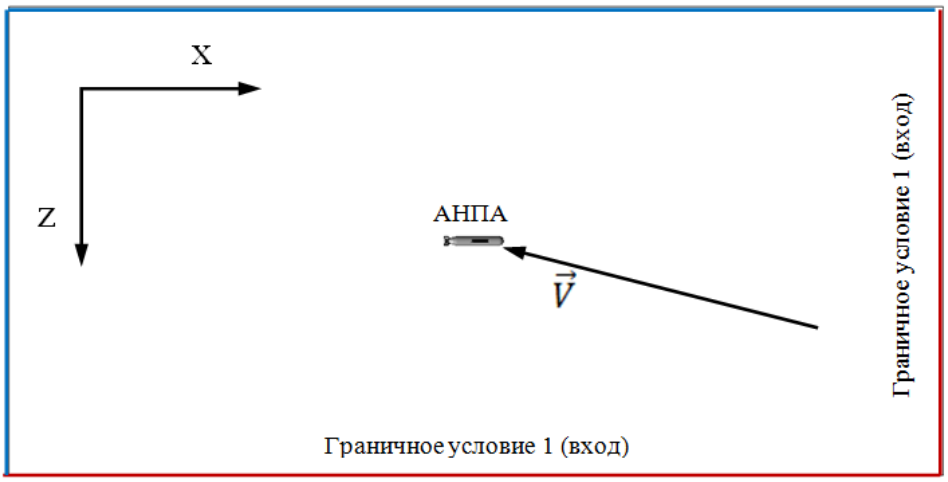


Рисунок 4 – Схема граничных условий для постановки задачи динамики АНПА

Результаты расчетов

Характеристики силового воздействия на аппарат, полученные в серии параметрических расчетов представлены в таблице 1. Для компонент силы наблюдаются естественные тенденции: сила сопротивления растет с ростом угла атаки, как и боковая сила. Что касается момента, разворачивающего аппарат по курсу (рис. 5), то он также увеличивается с увеличением угла атаки. Иными словами движение аппарата является неустойчивым по курсу, несмотря на наличие стабилизаторов.

Таблица 1. Компоненты силы и разворачивающий момент, действующие АНПА

α, град	**F_x, Н**	**F_z, Н**	**M_y, Н*м**
0	-27,36	1,1	3,7
-1	-27,4	5,2	-18,11
-2	-27,7	11,1	-35,3
-3	-28,3	18,3	-50,6
-4	-29,1	28,2	-59,1
-5	-30,3	38	-68,6
-6	-31,8	48	-78,1
-10	-41,48	94,1	-104,4
-20	-104,6	240,7	-117,5

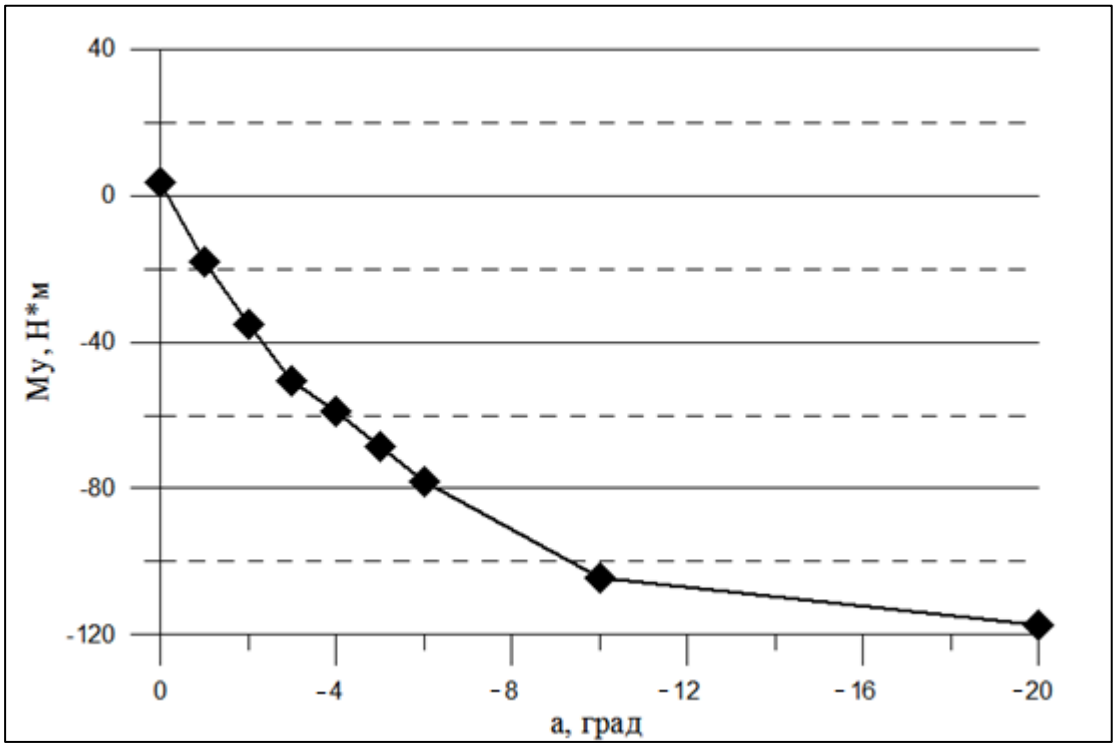


Рисунок 5 – Зависимость курсового момента от угла атаки

Более детальный расчет сил (табл. 2) показал, что момент, действующий на стабилизаторы (рис.6), действительно выравнивает аппарат, однако его амплитуда значительно меньше амплитуды разворачивающего момента, действующего на корпус, во всём рассматриваемом диапазоне углов атаки.

Таблица 2. Курсовой момент, действующие на различные элементы корпуса АНПА

α, град	**M_y, общий, Н*м**	**M_y, корпус, Н*м**	**M_y, стабилизаторы, Н*м**	**M_y, двигатели, Н*м**
0	3,7	2,19	0,2	1,36
-1	-18,11	-21,5	1,5	1,9
-2	-35,3	-43	5,9	1,86
-3	-50,6	-63	9,5	3
-4	-59,1	-80,2	17,8	3,2
-5	-68,6	-97	24,9	3,6
-6	-78,1	-113,5	31,2	4,04
-10	-104,4	-173	57,9	10,8
-20	-117,5	-280	135	28

Момент, действующий на стойки и корпуса двигателей (рис. 6), также является стабилизирующим, но не оказывает существенного влияния на общий момент.

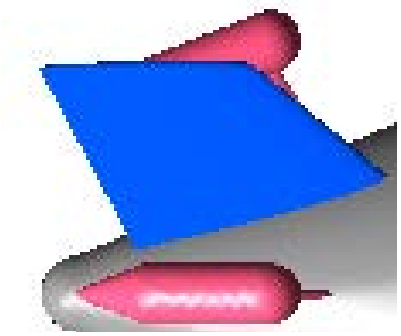


Рисунок 6 – Кормовая часть аппарата, цветами показаны элементы, на которых момент вычислялся отдельно: синий – стабилизаторы, красный – стойки и корпуса двигателей

Заключение

По результатам параметрических расчетов для данного типа АНПА показано, что курсовой момент, действующий на аппарат, стремится развернуть его ещё сильнее, то есть движение по курсу неустойчивое. Для стабилизации движения по курсу необходима система управления по углу атаки.

Для рассматриваемого аппарата винторулевая группа состоит из 4-х двигателей с винтами и 4-х стабилизаторов. При этом выравнивание аппарата, при его отклонении от курса возможно только за счет задания различной частоты вращения винтов на двигателях, оппозитно расположенных по отношению к вертикальной плоскости симметрии аппарата. Чем больше угол отклонения от курса, тем сильнее должны отличаться частоты вращения винтов, и соответственно, мощность, потребляемая каждым из двигателей. Важно отметить, что необходимо учитывать наличие проектных ограничений на частоту вращения винтов (ввиду конечности мощности данного типа двигателей).

Для продольной скорости аппарата 0.623 м/с, используемой в расчете, упомянутые ограничения на частоту вращения не помешают выровнять аппарат во всём исследованном диапазоне углов атаки $\pm 20^{o}$.

Однако увеличение маршевой скорости всего в 2 раза приведет к приблизительно четырёхкратному увеличению разворачивающего момента. В этом случае ограничение частоты вращения двигателей уже не позволит выровнять аппарат при увеличении угла атаки больше некоторого критического значения. Сказанное позволяет сделать заключение о несоответствии существующей винторулевой группы требуемым характеристикам управляемости аппарата на маршевой скорости, которая по заданию превышает используемую в расчетах скорость 0.623 м/с даже не в 2, а в 3 раза.

1. Васильев И.А. Возникновение сил сопротивления движению подводных роботов и других объектов морского базирования при работе подруливающих устройств / И.А. Васильев, Д.А. Вохминцев , С.А. Половко // Робототехника и техническая кибернетика. 2017. № 1(14). С. 51-54.
2. Вохминцев Д.А. Гидродинамический расчет на неподвижной сетке в исследовании динамики автономного необитаемого подводного аппарата // Робототехника и техническая кибернетика. 2016. № 1(10). С. 37-39.
3. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1974 – 712 с.
4. Menter F.R. Two equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications // AIAA Journal. 1994, Vol. 32. pp. 1598-1605.
5. ANSYS FLUENT 14.0 Theory Guide. ANSYS Inc., 2011.

V.A .Shurygin, V.A. Serov, I.V. Kovshov, S.A. Ustinov

THE DEVELOPMENT AND ENSURING THE EXPLOITATIONS OF THE ARCTIC OFFSHORE HYDROCARBONS FIELDS BY USING THE ROBOTIZED LEGGED PLATFORMS

Join-stock company «The Federal research-and-production center «Titan Barricades», Volgograd
cdb@cdbtitan.ru

Abstract

The Problems of using technological robotic platforms with legged drives for development of offshore oil and natural gas fields of the Arctic continental shelf are considered. The following problems can be solved with the usage of robotic legged platforms: deposit exploration, engineering survey, drilling of the wells for various purposes, supervising and maintenance of underwater equipment, laying of cables and pipelines on the deposit (including trench digging), connecting and disconnecting of electrical and hydraulic communications, taking soil samples, supervising of wells, installing bottom base and wellhead, control of the emission and leaks of gas, oil and the process fluids, transportation of consumables and spare parts.

The models of usage of robotic legged platform for the development of underwater oil and natural gas deposits of the Arctic shelf are offered.

The advantages of the offered technology are: reduction of time of design and arrangement of underwater mineral deposits, reduction of cost of drilling wells of various purposes, increasing mobility of the equipment within the range of facility on the shelf.

Key words: Underwater robotics, robotic legged platform, legged drive, offshore field, drilling.

В.А. Шурыгин, В.А. Серов, И.В. Ковшов, С.А. Устинов

ОБУСТРОЙСТВО И ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПОДВОДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УГЛЕВОДОРОДОВ АРКТИЧЕСКОГО ШЕЛЬФА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РОБОТИЗИРОВАННЫХ ШАГАЮЩИХ ПЛАТФОРМ

АО «Федеральный научно-производственный центр «Титан Баррикады», г. Волгоград
cdb@cdbtitan.ru

Аннотация

Рассматриваются вопросы применения технологических роботизированных платформ с шагающими движителями для решения следующих задач: разведка местности, инженерно-геологические изыскания и сейсмическая разведка, бурение скважин различного назначения, мониторинг и обслуживание подводного оборудования, прокладка кабелей и трубопроводов (в том числе с выполнением траншеи), подключение и отключение соединителей коммуникаций, взятие проб, мониторинг скважин, установка донного основания и устьевой обвязки скважины, ликвидация последствий аварийных ситуаций, транспортировка расходных материалов и комплектующих.

Сформулированы основные технические требования к подводным РШП и предложена модель их применения.

Основные преимущества предлагаемых технологий заключаются в ускорении и снижении стоимости проектирования и обустройства подводных месторождений, повышении мобильности оборудования на месторождении и в пределах арктического шельфа.

Ключевые слова: подводная робототехника, роботизированная шагающая платформа, шагающий движитель, подводное месторождение, бурение.

Введение

Освоение подводных месторождений Арктического континентального шельфа является важнейшим направлением развития топливно-энергетического комплекса и имеет стратегическое значение. Перспективные районы Арктики, содержащие до 25 % мировых запасов углеводородов, характеризуются воздействием сложных внешних воздействующих факторов, инженерно-геологическими и экологическими проблемами, связанными с необходимостью проведения работ под водой и льдом [1]. Значительные шельфовые ресурсы позволяют организовать новые нефтегазодобывающие центры, однако технологические системы для обустройства и эксплуатации

таких месторождений полезных ископаемых акваторий со сложной ледовой обстановкой в настоящее время практически отсутствуют. Существует проработка только отдельных технологий: бурение с использованием самоподъемных опорных оснований, бурение с самоходных судов [2, 3].

Обустройство и эксплуатация подводных месторождений, а также необходимость обеспечения их безопасности, охраны и обороны требуют развития технологий подводных грунтовых работ. К таким работам могут быть отнесены инженерно-геологические изыскания с проведением измерений параметров грунта и сейсмической разведкой, прокладка подводных коммуникаций (высоковольтных электрических и волоконно-оптических кабелей, трубопроводов, райзеров), бурение и обустройство подводных скважин, сбор донных отложений, ликвидация последствий аварийных ситуаций, спасательные работы, развертывание подводных систем охраны и обороны [2].

Анализ существующих технологий

Проведение подводно-технических работ с поверхности (рисунок 1) затруднено в арктических условиях (сложная ледовая обстановка, климатические условия), на малых глубинах (менее 15-20 м), а также в прибрежной (прибойной) зоне. Количество точек бурения при обустройстве подводного месторождения углеводородов (с учетом средних параметров систем размещения скважин месторождений арктического шельфа) может достигать нескольких сотен [1]. Тяжелые самоподъемные основания, рациональные при бурении добычных нефтегазовых скважин, применять для бурения разведочных скважин в таких условиях экономически нецелесообразно. Легкие самоподъемные основания характеризуются недостаточной безопасностью обслуживающего персонала (отсутствует вертолетная площадка), а также низким коэффициентом использования, значение которого зависит от погодных и гидродинамических условий окружающей среды.

Качка и дрейф создают при бурении ряд проблем при бурении с самоходного судна. По причине наличия вертикальных перемещений и горизонтальных перемещений затруднена поддержка рационального режима бурения, а следовательно, и обеспечение надежной работы бурового оборудования, что приводит к значительному снижению производительности и повышению стоимости работ. Кроме того, при проведении инженерных изысканий вдавливанием в грунт специальных зондов и снарядов (статическое зондирование и пенетрационный каротаж) качественные результаты исследований обеспечиваются только при неизменном положении вдавливающих механизмов. Достичь такого положения при размещении механизмов на судне, подверженном качке и дрейфу, практически невозможно [3].

Рисунок 1 – Судно кабелеукладчик проекта 15310 (слева) и самоподъемная плавучая буровая установка легкого класса (справа)

Плавающие (рисунок 2) и комбинированные донно-плавающие (рисунок 3) подводные аппараты имеют недостаточную энергетическую оснащенность для выполнения ряда грунтовых операций, ограниченное тяговое усилие, относительно небольшое (для аппаратов рабочего класса) время автономного функционирования, а также имеют ряд ограничений по применению в районах с сильными подводными течениями.

Существующие самоходные подводные донные колесные и гусеничные аппараты (рисунок 4) способны работать только на плотных грунтах с небольшими уклонами дна с существенным ограничением грунтовой проходимости и маневренности. На слабых грунтах возможна посадка таких аппаратов днищем на грунт с потерей сцепного веса. В случае применения гусеничных движителей

также возможны заклинивание и потеря гусеницы при попадании в движитель фрагментов грунта [4, 5].

Колесные и гусеничные амфибийные аппараты, работающие в прибрежной (прибойной) зоне – nearshore surveying vehicles (рисунок 5) подвержены наматыванию подводной растительности на движитель, а также по причине относительно низких тягово-сцепных характеристик ограничены по массе размещаемого технологического оборудования.

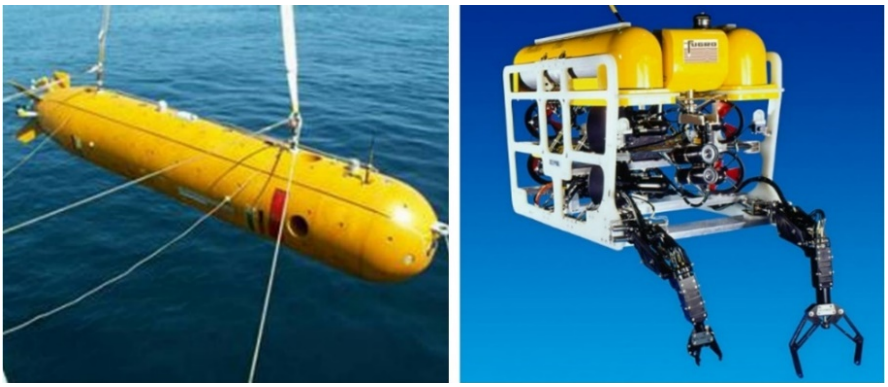


Рисунок 2 – Автономный необитаемый подводный аппарат Клавесин-1Р (слева), рабочий телеуправляемый подводный аппарат «Пантера Плюс» (справа)

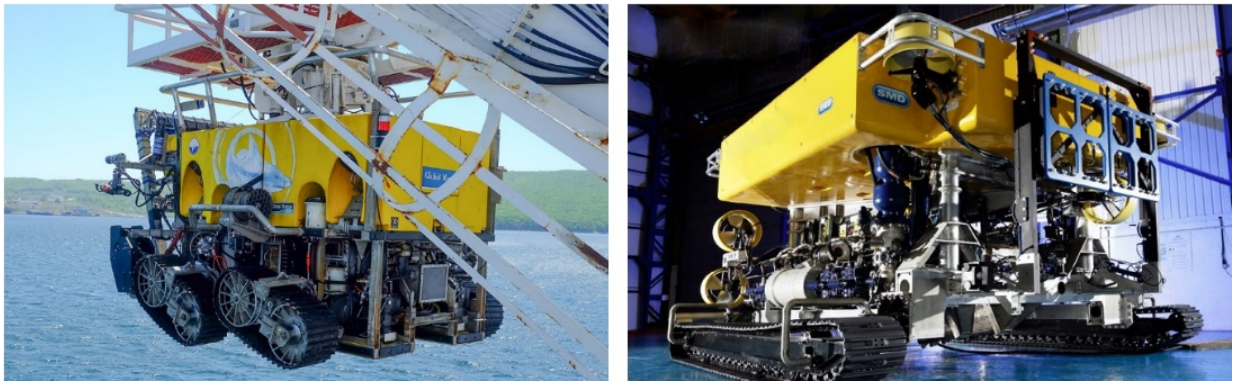


Рисунок 3 – Комбинированные донно-плавающие подводные аппараты – кабелеукладчики Global Marine (слева) и SMD (справа)

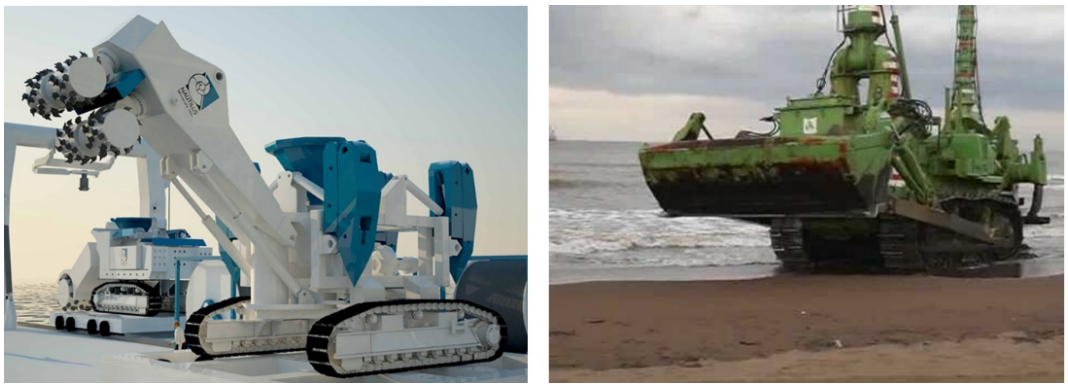


Рисунок 4 – Донные подводные аппараты: аппарат для добычи полезных ископаемых Nautilus Minerals (справа), подводный бульдозер Komatsu D155W (справа)

Рисунок 5 – Амфибийные аппараты, работающие в прибрежной (прибойной) зоне:
AMTC (слева), SPROV'er (в центре), CRAB (справа)

Все вышеперечисленные подводно-технические работы могут быть выполнены с применением подводных роботизированных платформ, оборудованных шагающими движителями.

Работы по созданию и исследованию подводных шагающих аппаратов в настоящее время проводятся несколькими зарубежными компаниями. Примерами таких разработок являются подводные роботы Benthic Autonomous Underwater Vehicle, Ariel и Ariel-II, а также аппарата для сбора донных отложений Nautilus Mineral [6, 7].

Также следует отметить телеуправляемый подводный аппарат CRABSTER CR200 (республика Корея). Шагающий движитель данного аппарата (рисунок 6) состоит из шести ног, две из которых способны выполнять функции манипулятора. Аппарат способен передвигаться на глубине до 200 м с максимальной скоростью 1 км/ч. Crabster CR200 был задействован в спасательных операциях при крушении парома Sewol в Желтом море на глубинах до 50 м. Аппарат успешно осуществлял разведку на морском дне в том числе в сложных условиях (видимость менее 0,2 м, подводные течения скоростью до 15 км/ч) аппарат успешно осуществлял разведку на морском дне [8].

Рисунок 6 – Подводный шагающий аппарат CRABSTER CR200

Основным недостатков существующих подводных роботов с «инсектоморфными» шагающими движителями является сложность адаптации к неровностям грунта согласованным движением нескольких приводов каждой ноги, а также наличие существенных энергозатрат на поддержание веса робота в процессе движения [9].

Работы по созданию шагающих роботов проводятся и в России. Федеральным научно-производственным центром «Титан-Баррикады» (г. Волгоград»), совместно с Волгоградским государственным техническим университетом выполнен ряд НИР и ОКР по созданию роботизированных шагающих платформ тяжелого класса. Результаты исследований на макетах и прототипах платформ с различными видами шагающих движителей показали высокую проходимость и маневренность платформ в том числе, при движении по дну естественного водоёма и заболоченной местности [10, 11].

Обоснование применения шагающих движителей

Использование шагающего способа передвижения дает качественный рост основных показателей по сравнению с колесными и гусеничными движителями. Имеют место высокие профильная проходимость и маневренность, допускающая перемещения произвольном направлении и разворот на месте, возможность работы на слабых грунтах, возможность управления опорными реакциями и поддержания заданного положения корпуса в процессе движения [12].

Значение коэффициента сцепления и коэффициента сопротивления движению для гусеничных движителей на слабых донных грунтах составляет 0,2…0,3 и 0,1…0,2 соответственно. Поэтому подводные аппараты, передвигающиеся по дну и оснащенные традиционными (гусеничными или колесными) движителями в случае слабонесущих грунтов двигаются на пределе сцепления, а их максимально возможная сила тяги не превосходит 25 % сцепного веса даже без учета сопротивления воды.

Для шагающих движителей возможен режим движения, при котором грунт не оказывает сопротивления движению, а только требует необходимых энергетических затрат на его прессование. Аналог коэффициента сцепления для шагающих платформ на подводных слабонесущих грунтах, как показали испытания, может быть больше 1, следовательно, максимально возможная по сцеплению сила тяги подводных шагающих платформ может превосходить их сцепной вес.

Значение коэффициента сцепления и коэффициента сопротивления движению для гусеничных движителей на слабых донных грунтах составляет 0,2…0,3 и 0,1…0,2 соответственно. Поэтому подводные аппараты, передвигающиеся по дну и оснащенные традиционными (гусеничными или колесными) движителями в случае слабонесущих грунтов двигаются на пределе сцепления, а их максимально возможная сила тяги не превосходит 20 % сцепного веса даже без учета сопротивления воды [12, 13].

Особенность взаимодействия шагающего движителя с грунтом заключается в том, что давление опор шагающей машины на грунт не является постоянной величиной. Проведенные исследования [14], показали, что при взаимодействии опоры шагающего движителя с грунтом возникают колебания, параметры которых зависят от характеристик грунта и скорости переступания. При этом существуют интервалы времени, в которых нормальная реакция превышает среднее значение. Выявленное увеличение максимальных значений нормальных реакций грунта по сравнению со статическими при переступании (смене опор шагающего движителя) приводит к увеличению мгновенного эффективного коэффициента сцепления и позволяет при необходимости реализовать повышенные тяговые усилия [14, 15].

Шагающие движители также могут обеспечить возможность управления положением корпуса платформы с установленным на нем технологическим оборудованием относительно опорной поверхности и положением отдельных опорных точек движителя в процессе движения (преодоление запрещенных зон без маневрирования). Управление положением корпуса платформы позволяет реализовать эффективную транспортно-технологическую систему, состоящую из нескольких платформ для перемещения и позиционирования крупногабаритных объектов (моногрузов).

Обоснование базовой конструкции роботизированной шагающей платформы

Вышеперечисленные преимущества шагающего способа передвижения максимально раскрываются при применении мобильных роботов, оборудованных шагающими движителями с независимыми приводами, обеспечивающими произвольное движение опорной точки, произвольную следовую дорожку, произвольный закон изменения скорости опоры (как при взаимодействии с грунтом, так и при переносе) и адаптацию к неровностям опорной поверхности [15, 16].

При значительном разнообразии таких шагающих движителей для применения в подводных роботизированных шагающих платформах наиболее предпочтительными являются ортогональные движители, которые характеризуются высокими показателями энергетической эффективности, в сочетании с относительно простым способом адаптации к опорной поверхности.

Ведущие звенья механизма ортогонального шагающего движителя совершают линейные перемещения во взаимно перпендикулярных направлениях (рисунок 7). Адаптация к опорной поверхности при применении данного типа движителя осуществляется за счёт различной длины выдвижения штока вертикального привода.

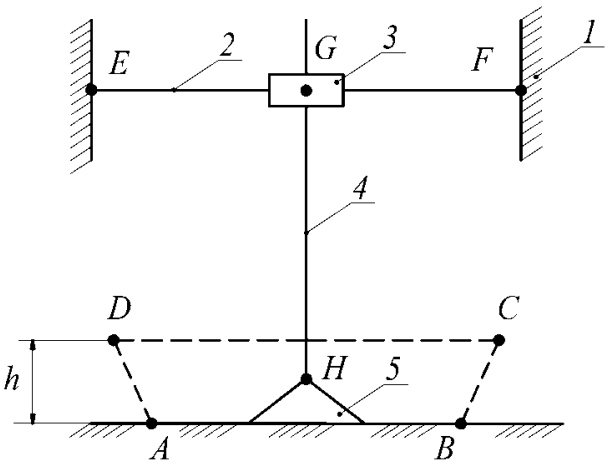


Рисунок 7 – Схема формирования простейшей рациональной траектории опорной точки ортогонального шагающего движителя относительно корпуса шагающей платформы

Участок траектории AB на котором опора механизма шагания взаимодействует с грунтом является опорной фазой движителя. Основное требование к траектории движения в опорной фазе – прямолинейность отрезка AB обусловлено целесообразностью обеспечения постоянного значения высоты подъема центра масс корпуса платформы относительно поверхности морского дна для обеспечения заданных показателей комфортабельности и энергетической эффективности движения. Прямолинейность движения опоры 5 на участке AB обеспечивается движением втулки 3 с вертикальным приводом (приводом адаптации) 4 вдоль горизонтальной направляющей 2. Участки траектории BC и AD соответствуют фазам подъема и опускания опоры – фазам адаптации к опорной поверхности. В фазе адаптации для исключения проскальзывания или буксования опоры по опорной поверхности необходимо обеспечить нулевую горизонтальную скорость движения опоры в абсолютном движении, что достигается организацией относительного горизонтального движения опоры со скоростью, равной по величине и противоположно направленной скорости корпуса шагающего робота. Участок CD траектории соответствует переносу опоры механизма шагания из одного крайнего положения в другое [9, 12, 17].

Основными достоинствами ортогональных шагающих движителей являются:

– достаточность применения в каждом механизме шагания только двух унифицированных приводов, в качестве которых могут быть использованы отработанные надежные поступательные механизмы;

– возможность существенного снижения энергозатрат движения при реализации фиксации положения (торможения) привода адаптации, опорный элемент которого взаимодействует с грунтом;

– относительно простые законы движения, позволяющие снизить требования к производительности технических средств управляющей системы и сократить количество применяемых датчиков.

На рисунке 8 представлена базовая конструкция роботизированной шагающей платформы (РШП), включающей в свой состав:

– несущую и опорно-поворотную платформу;

– восемь ортогональных шагающих движителей с приводами курсового движения и адаптации и шарнирно закрепленной на штоке каждого привода адаптации тарельчатой опорой;

– систему энергоснабжения;

– бортовую систему управления;

– информационную систему (датчики с устройствами сопряжения);

– систему навигации.

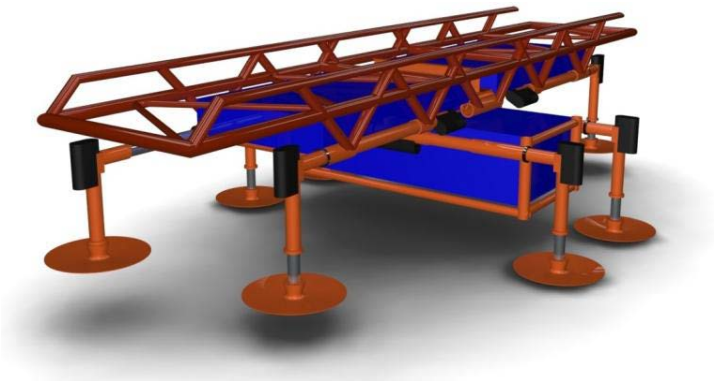


Рисунок 8 – Роботизированная шагающая платформа с ортогональными движителями

Технологическое оснащение такой роботизированной платформы определяется решаемыми задачами и областью применения и может содержать манипуляторы, оборудование подводной буровой установки, барабан с электрическим или волоконно-оптическим кабелем и др.

Ортогональные шагающие движители платформы целесообразно реализовывать в виде мехатронных модулей на базе электрических линейных приводов. Такой привод состоит из электродвигателя и инвертированной шарико-винтовой или роликово-винтовой передачи и оснащается датчиками положения штока и электрического тока двигателя, а также встроенным электромагнитным тормозом, фиксирующим шток привода по команде системы управления.

Подключение к мехатронного модуля к бортовой системе управления целесообразно выполнять по цифровому интерфейсу (Ethernet, CAN).

Следует отметить, что для ряда технологических задач (связанных в основном с перемещением по слабым грунтам без необходимости управления точками постановки опор), практический интерес также представляют также простые и надежные движители на базе цикловых механизмов [9, 11].

Классификация подводных роботизированных шагающих платформ

В таблице 1 представлена классификация подводных роботизированных шагающих платформ выполненная в соответствии с решаемыми задачами и характеристиками размещаемого технологического оборудования.

Таблица 1. Классификация РШП

Класс	**Полезная нагрузка**	**Решаемые задачи**
Сверхлегкий	до 250 кг	Разведка местности
Легкий	250 кг…2,5 т	Разведка маршрутов прокладки подводных коммуникаций; мониторинг и ремонт подводного оборудования без демонтажа отдельных узлов; подключение (отключение) соединителей подводного оборудования к подводным коммуникациям; аварийно-спасательные работы
Средний	2,5 т…30 т	Установка темплета куста скважин или донного основания, монтаж устьевой обвязки, подводной фонтанной аппаратуры и противовыбросового оборудования подводных скважин, сбор донных отложений, ремонт подводного оборудования с демонтажем узлов; борьба с выбросами и утечками газа, нефти и технологических жидкостей; прокладка подводных коммуникаций; доставка материалов и комплектующих.
Тяжелый	30…60 т	монтаж (демонтаж) крупногабаритного подводного оборудования с подключением (отключением) к подводным коммуникациям; разведка маршрутов прокладки подводных коммуникаций (с определением

		несущей способности грунта); прокладка кабелей, трубопроводов по месторождению, в том числе с выполнением траншеи, подводной сваркой, контролем стыков плети и укладкой в траншею; использование группы унифицированных движителей для транспортировки и прецизионного позиционирования крупногабаритных грузов, в том числе подводной буровой установки, основания бурового модуля подводного добычного комплекса, подводных обитаемых и необитаемых станций и др.

Технические требования к РШП

В соответствии с предложенной классификацией и решаемыми задачами в условиях арктического шельфа могут быть сформулированы следующие основные технические требования к подводным роботизированным шагающим платформам [2].

1. Глубина моря до 400 м (до 500 м в аварийном режиме).
2. Скорость хода по ровному дну - 2…5 км/час.
3. Скорость хода при прокладке кабелей и трубопроводов - до 0,5 км/час.
4. Уклон трассы на маршруте движения до 30 градусов.
5. Высота преодолеваемых препятствий:
 – для легкого класса до 0,5 м;
 – для среднего класса до 1 м;
 – для тяжелого класса до 2 м.
6. Ширина преодолеваемого рва (трещины)
 – для легкого класса до 1,5 м;
 – для среднего класса до 2,5 м;
 – для тяжелого класса до 5 м.
7. Точность позиционирования выбранной точки платформы 1,0 м.
8. Точность прецизионного позиционирования выбранной точки платформы относительно оборудования 0,01 м.

Модель применения РШП при подводной добыче углеводородов.

Доставка РШП на береговую базу может осуществляться любым видом транспорта. По габаритно-весовым характеристикам платформа тяжелого класса в походном положении соответствует ISO-контейнеру серии 1 (40 футовому), и ее погрузка на судно сопровождения не требует специального кранового оборудования. От береговой базы платформы перемещаются на судне сопровождения, оборудованном краном или на буксируемых понтонах, и погружаются под воду. Также возможна доставка платформ с использованием существующего в настоящее время оборудования подводных лодок.

После определения своих геодезических координат платформы перемещаются на площадку проведения работ, производят разведку местности с определением несущей способности грунта. Для бурения скважин целесообразно привлекать несколько РШП. На рисунке 9 показана буровая установка из двух платформ, организуемая с проведением взаимного позиционирования платформ, установкой временной опорной плиты, стыковкой РШП и подъемом направляющих буровой установки [2, 17].

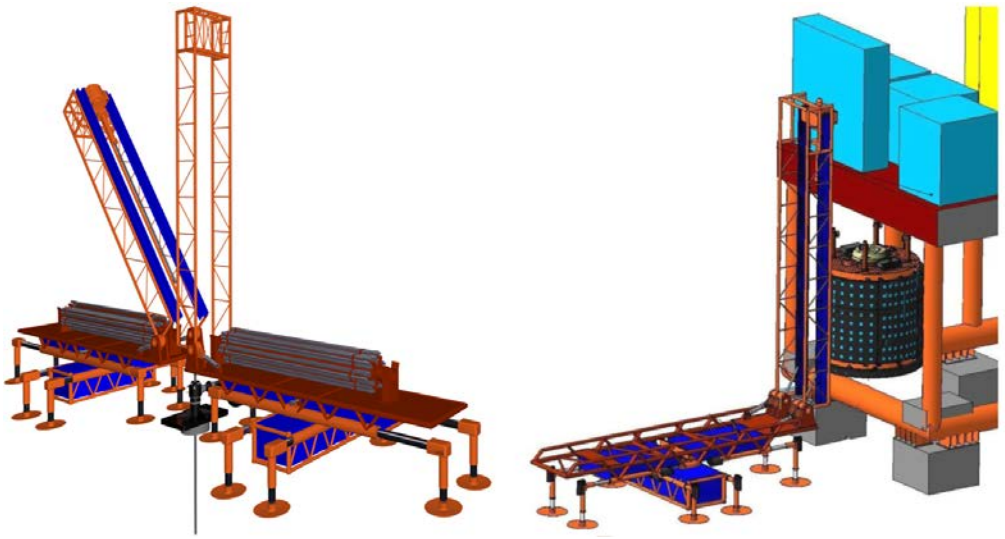


Рисунок 9 – Применение роботизированных шагающих платформ тяжелого класса: самоходная буровая установка на базе двух платформ (слева), эвакуация подводного устьевого оборудования с бурового модуля (справа)

С использованием буровой установки осуществляется бурение пилотного ствола, установка направления нефтегазовой скважины с защитным колпаком, после чего платформы в состыкованном состоянии передвигаются на новую точку бурения. Грунтовые работы на дне – выравнивание площадок, устройство траншей, закрытие их грунтом и др. - производятся навесным технологическим оборудованием. В качестве бульдозерного отвала возможно использование донной опорной плиты.

Разведка местности на площадках установки модулей подводного бурового комплекса и маршрутах подводных коммуникаций в этом случае может осуществляться с проведением сплошных или выборочных пенетрационных измерений по определению характеристик грунта с использованием шагающих движителей платформы. Решение этой задачи обеспечивается определением в процессе перемещения несущей способности грунта методом пенетрации (статического нагружения) и сравнением ее с априорной моделью грунта, заложенной в систему управления на основании ожидаемых инженерно-геологических условий месторождения [18].

Заключение

С применением роботизированных шагающих платформ могут быть решен ряд основных задач обустройства и эксплуатации подводных (подледных) месторождений углеводородов. Основными преимуществами, предложенной технологии являются: ускорение и снижение стоимости обустройства и эксплуатации подводных (подледных) месторождений, а также повышение мобильности оборудования на месторождении и в пределах всего Арктического шельфа.

Предлагаемая технология проведения работ на дне моря с использованием роботизированных шагающих платформ может быть составной частью технологии освоения подводных (подледных) месторождений углеводородов, в том числе, с использованием роботизированных буровых комплексов, а также использоваться при освоении морского дна в иных целях.

1. Шурыгин В.А. Концепция обустройства и обеспечения эксплуатации месторождений углеводородов на морском шельфе с использованием роботизированных шагающих платформ / В.А. Шурыгин, В.А. Серов, И.В. Ковшов // Труды Международной конференции и выставки по судостроению и разработке высокотехнологичного оборудования для освоения континентального шельфа Offshore Marintec Russia – 2016 и 16-го Петербургского международного энергетического форума 4–7 октября 2016 года, Санкт-Петербург — СПб.: ХИМИЗДАТ, 2016. — С. 113-120.
2. Серов В.А. Задачи технологических роботизированных шагающих платформ при освоении подводных (подлёдных) месторождений полезных ископаемых / В.А. Серов, И.В. Ковшов, С.А. Устинов // Известия ЮФУ. Технические науки. - 2017. - № 9 (194). - С. 181-191.
3. Пронкин А.П., Хворостовский И.С., Хворостовский С.С. Морские буровые моноопорные основания. Теоретические основы проектирования и эксплуатации. Под ред. С.С. Хворостовского. — М.: ООО "Недра-Бизнесцентр", 2002. - 303 с.

4. Чернышев В.В. Арыканцев В.В. МАК-1 – подводный шагающий робот // Робототехника и техническая кибернетика. — 2015. — № 2. — С. 45-50.
5. Чернышев В. В. Моделирование динамики взаимодействия движителя подводного шагающего аппарата с грунтом с низкой несущей способностью / В.В. Чернышев, В.А. Шурыгин // Известия ВолгГТУ. — 2013. — №. 24 (127). — С.82-86.
6. Jin-Ho Kim, Tae-Kyeong Yeu, Suk-Min Yoon, Hyung-Woo Kim, Jong-Su Choi, Cheon-Hong Min and Sup Hong Electric-Electronic System of Pilot Mining Robot, MineRo-II // Proceedings of the Tenth ISOPE Ocean Mining and Gas Hydrates Symposium Szczecin, Poland, September 22-26, 2013. pp. 269-273
7. Verichev S., Laurens de Jonge, Wiebe B., Rodney N. Deep mining: from exploration to exploitation // Minerals of the Ocean – 7 & Deep-Sea Minerals and Mining – 4: abstracts of International Conference / VNIIOkeangeologia. St. Petersburg, 2014. P. 126-138.
8. Yoo, S.Y., Jun, B.H., Shim, H. (2014). Design of static gait algorithm for hexapod subsea walking robot: Crabster, Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, A, Volume 38, Issue 9, September 2014, pp. 989-997.
9. Problems of increasing efficiency and experience of walking machines elaborating / E.S. Briskin, V.A. Shurygin, V.V. Chernyshev, A.V. Maloletov, N.G. Sharonov, Ya.V. Kalinin, A.V. Leonard, V.A. Serov, K. B. Mironenko, S. A. Ustinov // Advances on theory and practice of robots and manipulators: proceedings of ROMANSY 2014 XX CISM-IFToMM Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulators. — 2014. — pp. 383-390.
10. Отработка методов нечеткого управления шагающим роботом «Ортоног» в полевых условиях / Е.С. Брискин, В.В. Чернышев, Н.Г. Шаронов, В.А. Серов, К.Б. Мироненко, С.А. Устинов // Исследования наукограда. — 2013. — № 2. — С.43-48.
11. Design and underwater tests of subsea walking hexapod MAK-1 / В.В. Чернышев, В.В. Арыканцев, Ан.Е. Гаврилов, Я.В. Калинин, Н.Г. Шаронов // Proceedings of the ASME 2016 35th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering OMAE2016 (Busan, South Korea, June 19-24, 2016) / Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OOAE) Division of The American Society of Mechanical Engineers (ASME), Pusan National University. – [Busan], 2016. – 9 p.
12. Брискин Е.С. Сравнительный анализ колесных, гусеничных и шагающих машин / Е.С. Брискин, В.В. Чернышев, А.В. Малолетов, Н.Г. Шаронов // Робототехника и техническая кибернетика. — 2013. — № 1 (1). — С. 6-14.
13. Арыканцев В.В., Чернышев В.В. Подводные исследования тягово-сцепных свойств и проходимости шагающего аппарата МАК-1 // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 10. С. 169–178.
14. Брискин Е.С. Моделирование динамики смены стоп шагающих машин. Е.С. Брискин, В.В. Чернышев // Искусственный интеллект. — 2009. — № 3. — С.293-299.
15. Об управлении адаптацией ортогональных шагающих движителей к опорной поверхности / Брискин Е.С., Калинин Я.В., Малолетов А.В., Серов В.А., Устинов С.А. // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. — 2017. — № 3. С. 184-190.
16. Шурыгин В. А. Моделирование движения шагающей машины с ортогонально-поворотными движителями / В. А. Шурыгин, В. А. Серов, Н. Г. Шаронов // Известия ВолгГТУ. — 2011. — №11. — С. 41-44.
17. Технология применения подводных шагающих роботизированных платформ при освоении подводных (подледных) месторождений углеводородов / В.А.Шурыгин., В.А.Серов., И.В.Ковшов., С.А.Устинов // Седьмая Всероссийская научно-техническая конференция «Технические проблемы освоения мирового океана» (г. Владивосток, 2-6 октября 2017 г.): материалы конференции / Институт проблем морских технологий Дальневосточного отделения РАН. — 2017. — С.43-47
18. Алгоритм адаптации подводной роботизированной шагающей платформы на маршруте движения / И.В. Ковшов, Ю.С. Рябова, В.А. Серов, С.А. Устинов // XXXVII Всероссийская конференция по проблемам науки и технологий, посвящённая 70-летию Государственного ракетного центра им. академика В.П. Макеева (г. Миасс, Челябинская обл., 13-15 июня 2017 г.) / РАН, Мин-во обороны РФ, Межрегиональный совет по науке и технологиям [и др.]. — Москва, 2017. — Т. 2. — С. 124-132.

ДЛЯ ЗАМЕТОК
NOTES

ДЛЯ ЗАМЕТОК
NOTES

Труды
Международной научно-технической конференции

ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ РОБОТОТЕХНИКА И КОНВЕРСИОННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ

7-8 июня 2018 года, Санкт-Петербург

Proceedings
of the International Scientific and Technological Conference

EXTREME ROBOTICS AND CONVERSION TENDENCIES

June 7-8, 2018, Saint-Petersburg, Russia

ISBN 978-5-907050-39-6

Издается в электронном виде
Формат 60x84 1/8
Гарнитура Times New Roman.
Печ. л. 67,8
Издано в ИПЦ ООО «Политехника Сервис»
190005, Санкт-Петербург, Измайловский пр., 18 Д