Труды
международной научно-технической конференции

ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ РОБОТОТЕХНИКА

8-9 октября 2015 года, Санкт-Петербург

Proceedings
of the International Scientific and Technological Conference

EXTREME ROBOTICS

October 8-9, 2015, Saint-Petersburg, Russia

er.rtc.ru

УДК 004.896.007.52
ББК 32813
Э41

ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ РОБОТОТЕХНИКА. // Труды международной научно-технической конференции. – Санкт-Петербург: Изд-во «Политехника-сервис», 2015. – 376 с.

Материалы сборника отражают круг актуальных проблем и задач в сфере робототехнических систем и средств безопасности, представленных на международной научно-технической конференции «ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ РОБОТОТЕХНИКА (ЭР-2015)».

Проект реализован при финансовой поддержке Минобрнауки России,
г/к № 14.598.11.0057 в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы»

Доклады опубликованы в авторской редакции.

Дизайн Марины Вегеле, e-mail: m.vegele@rtc.ru

EXTREME ROBOTICS. // Proceedings of the International Scientific and Technological Conference. – Saint-Petersburg: «Politechnika-service», 2015. – 376 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 (ER-2015)».

The project is held under financial support of Ministry of Education and Science of the Russian Federation

Reports are published with author's correction only.

Design by Marina Vegele, e-mail: m.vegele@rtc.ru

ISBN 978-5-906782-77-9

Уважаемые коллеги, участники конференции!

От имени Министерства образования и науки Российской Федерации и от себя лично приветствую вас на международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника».

Для современной робототехники характерно быстрое развитие и широкое применение практически во всех областях человеческой деятельности: в промышленности, медицине и социальной сфере, для работы в экстремальных условиях, при борьбе с терроризмом, пожаротушении, решении оборонных задач, проблем атомной энергетики.

Гарантией успешности и эффективности мероприятия является тот факт, что в рамках конференции собираются вместе представители научного сообщества, силовых министерств и ведомств России, бизнеса и промышленности для совместного поиска решений в области обеспечения безопасности.

Встречи такого уровня говорят о серьезном взаимном интересе к решению важных государственных задач и способствуют обмену передовым опытом, расширению сотрудничества между образовательными, научно-исследовательскими и производственными организациями.

Надеюсь, что в ходе конференции будут выработаны новые стратегии развития экстремальной робототехники по ключевым вопросам, связанным с разработкой и созданием робототехнических систем и средств безопасности нового поколения.

Хочу пожелать участникам конференции интересной работы, успешных деловых и научных контактов!

Директор Департамента науки и технологий Минобрнауки России

Dear colleagues and participants of Conference!

On behalf of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation and on my personal behalf I welcome you to the international scientific and technical Conference «Extreme Robotics».

Up-to-date robotics is featured by rapid development and wide application in almost all areas of human activity: industry, health care and social sphere, operation in extreme conditions, fight against terrorism, firefighting, defense purposes, nuclear power engineering.

The fact that the conference gathers the representatives of the scientific community, defense and law enforcement ministries and departments of Russia, business and industry to jointly seek solutions in security shall ensure the event to be successful and effective.

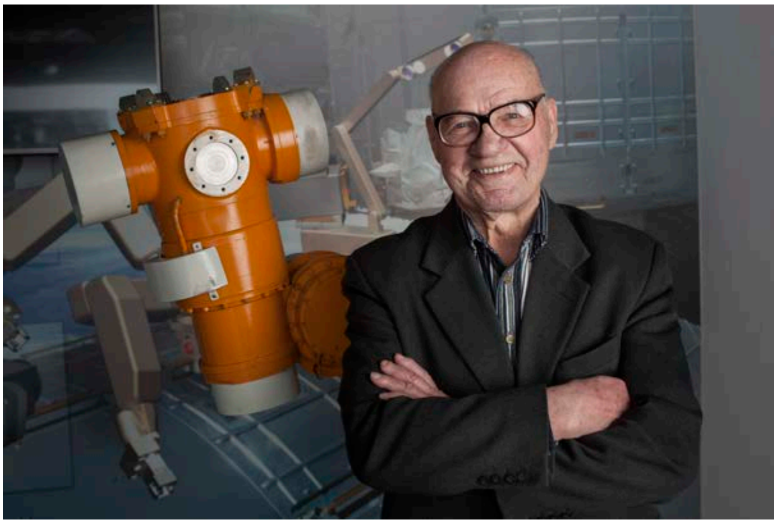
Such high-level meetings suggest a serious mutual interest in solving important national objectives and promote best practice exchange, increased cooperation between educational, research and industrial organizations.

I hope that the Conference will allow to elaborate new strategies on key issues of extreme robotics related to the development and creation of robotic systems and new generation security facilities.

I wish you interesting work, successful business and scientific contacts!

Director of the Department of Science and Technologies of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation

С.В. Салихов
S.V. Salikhov



Уважаемые коллеги!

Приветствуем участников и гостей международной конференции «Экстремальная робототехника» в стенах государственного научного центра Российской Федерации «ЦНИИ робототехники и технической кибернетики».

Это 26-ая конференция, и на ней, как всегда, будет обсуждаться, что нового появилось в области экстремальной робототехники, ставшей сегодня авангардом научно-технического развития робототехники в целом.

Особое внимание будет уделено ключевым вопросам управления и навигации робототехнических комплексов, предназначенных для работы в экстремальных условиях и чрезвычайных ситуациях.

Традиционно мы уделяем особое внимание выступлению с докладами молодых учёных, инженеров, конструкторов, презентациям новых творческих коллективов, представляющих впервые в рамках нашей конференции свои разработки.

Желаю всем участникам конференции успешных выступлений и новых деловых контактов!

Председатель программного комитета
международной конференции «ЭР-2015»,
д.т.н., профессор

Dear colleagues!

We are pleased to greet the participants and guests of the international Conference «Extreme Robotics» within the walls of Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics.

This is the 26th Conference, and during this event it will, as always, be discussed, what new has happened in Extreme Robotics as far as it is at the cutting edge of scientific and technological development of robotics nowadays.

The main attention will be paid to the key issues of control and navigation methods of robotic systems, designed for operating in extreme conditions and emergency situations.

We traditionally pay special attention to the reports of young scientists, engineers, designers, presentations of new creative teams representing their developments at our conference for the first time.

Wish all the participants of the Conference successful reports and new business contacts!

Chairman of the Program Committee of the
International Conference ER-2015,
doctor, professor

Е.И. Юревич
E.I. Yurevich

ОРГАНИЗАТОР

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

ПРИ ПОДДЕРЖКЕ

- *Министерства образования и науки Российской Федерации*
- *Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий*
- *Министерства обороны Российской Федерации*
- *Федерального космического агентства*
- *Отделения энергетики, машиностроения, механики и процессов управления РАН*
- *Ассоциации государственных научных центров «Наука»*
- *Правительства Санкт-Петербурга*

ИНФОРМАЦИОННАЯ ПОДДЕРЖКА

- *Теоретический и прикладной научно-технический журнал «Мехатроника, автоматизация, управление» (рекомендован ВАК), Москва*
- *Еженедельная газета научного сообщества «Поиск», Москва*
- *Журнал «Новый Оборонный Заказ. Стратегии», Санкт-Петербург*
- *Журнал «Инновации» (рекомендован ВАК), Санкт-Петербург*
- *Газета «Компьютер-Информ», Санкт-Петербург*

ORGANIZER

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

WITH SUPPORT OF

- *Minisry of Education and Science of the Russian Federation*
- *EMERCOM of Russia*
- *Ministry of Defence of the Russia*
- *Federal Space Agency*
- *RAS Academic Council for Mechatronics and Robotics*
- *State Scientific Centers of the Russian Federation Association*
- *Government of St. Petersburg*
- *Public Organization «Union of Industrialists and Entrepreneurs of St. Petersburg»*

INFORMATION SUPPORT

- *Journal «Mechatronics, Automation, Control», Moscow, Russia*
- *Weekly newspaper of scientific community «Poisk», Moscow, Russia*
- *Journal «New Defensive Order. Strategy», Saint-Petersburg, Russia*
- *Journal «Innovation», Saint-Petersburg, Russia*
- *Newspaper «Computer Inform», Saint-Petersburg*

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

Председатель:

- ***Юревич Евгений Иванович**, д.т.н., профессор СПбГПУ, почетный главный конструктор ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург; член Научного совета РАН по робототехнике и мехатронике*

Заместитель председателя:

- ***Цариченко Сергей Георгиевич**, д.т.н., профессор, заместитель начальника ВНИИПО МЧС России, начальник НИЦ Робототехники, Балашиха, Моск. обл.; член Научного совета РАН по робототехнике и мехатронике*

Ученый секретарь:

- ***Павлов Владимир Анатольевич,** к.т.н., начальник отдела ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург*

Члены программного комитета:

- ***Андреев Валерий Павлович**, д.т.н., профессор МГТУ «СТАНКИН», Москва*
- ***Брискин Евгений Самуилович**, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой ВолгГТУ, Волгоград*
- ***Градецкий Валерий Георгиевич**, д.т.н., профессор, главный научный сотрудник ИПМех им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва; член Научного совета РАН по робототехнике и мехатронике; представитель Международной программы перспективной робототехники (IARP) в России*
- ***Заборовский Владимир Сергеевич**, д.т.н., профессор СПбГПУ; заместитель главного конструктора ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург; член Международной ассоциации академических, исследовательских и промышленных предприятий (IARIA)*
- ***Лохин Валерий Михайлович**, д.т.н., профессор МИРЭА, Москва; заместитель председателя Научного совета РАН по робототехнике и мехатронике*
- ***Максимов Алексей Алексеевич,** директор НУЦ «Робототехника» МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва*
- ***Павловский Владимир Евгеньевич**, д.ф.-м.н., профессор, ведущий научный сотрудник ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, Москва; член Научного совета РАН по робототехнике и мехатронике*
- ***Подураев Юрий Викторович**, д.т.н., профессор, проректор по учебной работе, заведующий кафедрой МГТУ «СТАНКИН», Москва; член Научного совета РАН по робототехнике и мехатронике*
- ***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*
- ***Филимонов Николай Борисович**, д.т.н., профессор, главный редактор ежемесячного научно-технического и производственного журнала «Мехатроника, автоматизация, управление (МАУ)», Москва*
- ***Ющенко Аркадий Семенович**, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой НУЦ «Робототехника» МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва*

PROGRAM COMMITTEE

Chairman:

- ***Yurevich Eugeny**, Doctor of Technical Sciences, Professor of St-Petersburg State Polytechnic University, Honorary Chief Designer of RTC, Saint-Petersburg; member of RAS Academic Council on Robotics and Mechatronics*

Deputy Chairman:

- ***Tsarichenko Sergey**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Deputy Chief of All-Russian Research and Development Institute for Fire-fighting of EMERCOM, Head of Research Center for Robotics, Balashikha, Moscow region.; member of RAS Academic Council on Robotics and Mechatronics*

Academic Secretary:

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

Members of Program Committee:

- ***Andreev Victor**, Doctor of Technical Sciences, Professor of Moscow State University of Technology «STANKIN»*
- ***Briskin Eugeny**, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of Chair, Volgograd State Technical University, Volgograd*
- ***Gradetsky Valery**, Doctor of Technical Sciences, Professor, chief researcher of Institute for Problems in Mechanics of RAS, Moscow; member of RAS Academic Council on Robotics and Mechatronics; representative of International Advanced Robotics Program (IARP) in Russia*
- ***Zaborovsky Vladimir**, Doctor of Technical Sciences, Professor of St-Petersburg State Polytechnic University; Deputy Chief Designer of RTC, Saint-Petersbueg; member of the International Academy, Research and Industry Association (IARIA)*
- ***Lokhin Valery**, Doctor of Technical Sciences, Professor of Moscow State Technical University for Radiotechnology, Electronics and Automation Engineering, Moscow; Deputy Chairman of RAS Academic Council on Robotics and Mechatronics*
- ***Maksimov Alexey**, Director Center of Education and Research «Robotics» in Baumann State Technical University, Moscow*
- ***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*
- ***Poduraev Yuriy**, Doctor of Technical Sciences, Vice-rector for Education, Head of Chair in Moscow State University of Technology «STANKIN»; member of RAS Academic Council on Robotics and Mechatronics*
- ***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*
- ***Filimonov Nikolai**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Editor of monthly scientific-and-technological and production journal «Mechatronics, Automation and Contro»l, Moscow*
- ***Yushchenko Arkady** Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Chair, Center of Education and Research «Robotics» in Baumann State Technical University, Moscow*

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

Председатель:

- ***Лопота Александр Витальевич**, к.э.н., директор-главный конструктор ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург*

Заместитель председателя:

- ***Коренко Наталья Львовна**, руководитель информационно-аналитического центра ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург*

Секретарь:

- ***Вольпяс Татьяна Владимировна**, ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург*

Члены организационного комитета:

- ***Горская Ирина Васильевна**, генеральный директор Ассоциации ГНЦ «Наука», Москва*

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

- ***Ермолов Иван Леонидович**, к.т.н., МГТУ «СТАНКИН»; ученый секретарь Научного совета РАН по робототехнике и мехатронике; представитель Европейской ассоциации по робототехнике (EURON)*

- ***Иванов Александр Владиславович**, заместитель директора ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург*

- ***Катенев Владимир Иванович**, президент Санкт-Петербургской торгово-промышленной палаты*

- ***Кондратьев Александр Сергеевич**, к.т.н., заместитель директора ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург*

- ***Максимов Андрей Станиславович**, председатель Комитета по науке и высшей школе Санкт-Петербурга*

- ***Мейксин Максим Семёнович**, председатель Комитета по промышленной политике и инновациям Санкт-Петербурга*

- ***Михайлов Борис Борисович**, к.т.н., доцент НУЦ «Робототехника» МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва*

- ***Юдин Виктор Иванович**, к.ф.-м.н., заместитель директора ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург*

- ***Яковлев Константин Сергеевич**, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» РАН, член Научного совета Российской ассоциации искусственного интеллекта*

ORGANIZING COMMITTEE

Chairman:

- ***Lopota Alexander**, Doctor in Economics, 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**, RTC, Saint-Petersburg*

Members of organizing committee:

- ***Ermolov Ivan**, Doctor of Technical Sciences, Moscow State University of Technology «STANKIN» ; 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*
- ***Gryaznov Nikolai**, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Deputy Director for Science, RTC, Saint-Petersburg*
- ***Ivanov Alexander**, Deputy Director of RTC, Saint-Petersburg*
- ***Katenev Vladimir**, president of Saint-Petersburg chamber of commerce and industry*
- ***Kondratyev Alexander**, Doctor of Technical Sciences, Deputy Director of RTC, Saint-Petersburg*
- ***Maksimov Andrey**, Chairman of Committee for education and higher school of Saint-Petersburg*
- ***Meyksin Maksim**, Chairman of Committee for industrial policy and innovations of Saint-Petersburg*
- ***Mikhailov Boris**, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Center of Education and Research «Robotics» in Baumann State Technical University, Moscow*
- ***Yakovlev Konstantin**, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, chief researcher of Federal research center «Informatics and Control» of the Russian Academy of Sciences; member of Scientific council of the Russian association of artificial intelligence*
- ***Yudin Victor**, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Deputy Director of RTC, Saint-Petersburg*

СОДЕРЖАНИЕ .... CONTENTS

N. Rudianov, A. Ryabov, V. Kruschev

LAND ROBOTIC COMPLEXES AS ELEMENT OF SYSTEM OF DEFENSE OF OBJECTS AND TERRITORY OF RUSSIA

3 Central Scientific Research Institute of the Ministry of Defence, Moscow, Russia

Н.А. Рудианов, А.В. Рябов, В.С. Хрущев

НАЗЕМНЫЕ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ КАК ЭЛЕМЕНТ СИСТЕМЫ ОБОРОНЫ ОБЪЕКТОВ И ТЕРРИТОРИЙ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

3 ЦНИИ МО РФ, Москва

Аннотация

В статье рассматриваются проблемные вопросы охраны и обороны объектов и позиционных районов. Предложены принципы построения дистанционно-управляемого разведывательно-огневого комплекса (ДУ РОК), использующего штатные средства разведки и огневого воздействия (поражения). Рассматривается состав и основные характеристики комплекса. Показан модернизационный потенциал ДУ РОК.

Ключевые слова: оборона объектов, дистанционное управление, разведывательно-огневой комплекс, штатное вооружение.

Угрозы, возникающие перед Российской Федерацией, обладающей самой большой территорией, самой протяженной сухопутной границей в мире, многочисленными удобными, с точки зрения высадки десантов, прибрежными районами, заставляют поднять вопрос о разработке таких робототехнических комплексов (РТК), которые аккумулируют в себе преимущества комплекса с большой огневой мощью, при этом использующих традиционное штатное вооружение и военную технику. Назрела необходимость создания систем вооружения, прикрывающих значительное пространство, в первую очередь, дистанционно-управляемые разведывательно-огневые комплексы.

Такой ДУ РОК должен выполнять задачи:

– охраны и обороны позиционных районов (огневых и стартовых позиций, командных пунктов, узлов связи, специальной военной техники, полевых складов и других важных военных объектов);
– контроля, охраны и обороны основных дорог, перекрестков, лощин, оврагов, горных перевалов, троп, акведуков, мостов, тоннелей, водных переправ и др. важных участков местности и инженерных сооружений, в том числе в горных и приграничных районах;
– обеспечения полосы прикрытия войск, находящихся в обороне, с целью срыва внезапности наступления противника и обороны заданного района (участка местности) до введения в бой основных сил;
– охраны и обороны районов возможной высадки воздушных (морских) десантов, мест и выжидательных районов войск от нападения диверсантов (террористов).

Особую актуальность приобретают вопросы охраны и обороны интенсивно развивающейся в настоящее время инфраструктуры арктических районов [1], где в силу климатических особенностей сложно или невозможно организовать оборону объектов традиционными способами.

На первом этапе предлагается ДУ РОК в следующем составе:

– пункт дистанционного управления;
– транспортная машина;
– до 4 боевых постов.

Боевой пост состоит из 4…6 роботизированных модулей различного назначения.

Типы роботизированных модулей боевого поста:

– разведывательный роботизированный модуль;
– пулеметный роботизированный огневой модуль;
– гранатометный роботизированный огневой модуль;
– артиллерийский модуль;
– противотанковый роботизированный модуль.

Возможны и другие варианты модулей боевого поста:

– радиолокационный роботизированный разведывательный модуль;
– огнеметный роботизированный огневой модуль;
– роботизированный модуль оптико-электронного противодействия;
– зенитный роботизированный модуль др.

Роботизированные модули объединяются в боевой пост. Типовой состав боевого поста:
– один разведывательный роботизированный модуль;
– один пулеметный роботизированный модуль;
– один гранатометный роботизированный модуль.

В зависимости от конкретных условий состав боевого поста может быть дополнен за счет иных роботизированных модулей. Аппаратура боевого поста должна обеспечивать объединение до шести роботизированных модулей различного назначения.

ДУ РОК в войсковых формированиях должен обеспечивать развертывание и одновременное управление боевой работой до четырех боевых постов различного состава.

При этом зона ответственности одного боевого поста:
– по фронту – не менее 800…1000 м;
– по глубине (дальности) – не менее 700…1000 м.

Типовые цели, поражаемые ДУ РОК:
– различные типы бронетанковой техники;
– легкобронированная колесная и гусеничная военная техника;
– групповая движущаяся живая сила в средствах индивидуального бронирования;
– открыто расположенная и замаскированная групповая неподвижная живая сила вероятного противника.

В состав пункта дистанционного управления должны входить:
– автоматизированное рабочее место командира;
– автоматизированные рабочие места операторов разведывательных и огневых модулей;
– комплект аппаратуры связи с вышестоящим командованием;
– комплект аппаратуры связи с четырьмя боевыми постами;

Максимальная удаленность пункта дистанционного управления от боевого поста – не менее 1300…1500 м.

Транспортная машина предназначена для:

загрузки, транспортировки, проверки и установки на местности роботизированных модулей из расчета на 2 боевых поста;

подвоза и доукомплектования вооружения боевых постов боекомплектом и расходными материалами из расчета 2-х боевых комплектов на один боевой пост;

замены вышедших из строя и поврежденных роботизированных модулей боевых постов.

В ДУ РОК используются штатные, принятые на снабжение вооружение и средства радиолокационного и оптико-электронного обнаружения и сопровождения, поэтому ДУ РОК не потребует больших затрат на разработку, производство и эксплуатацию. Комплекс может быть разработан и испытан в кратчайшие сроки.

При боевой работе ДУ РОК не требует специально подготовленных в инженерном отношении позиций, использование штатной техники гарантирует всепогодность, всесуточность и применения, в том числе в неблагоприятных метеорологических условиях.

При этом комплекс имеет высокий модернизационный потенциал. По мере разработки соответствующего программного обеспечения полной автоматизации поддаются обнаружение, распознавание и сопровождение целей, вплоть до принятия решения на открытия огня, что приведет к сокращению количества операторов.

На следующих этапах роботизированные модули могут быть как стационарными (роботизированный мини укрепрайон), так и мобильными, и менять свое положение в ходе боя. Например, разведывательные модули могут быть неподвижными, а боевые располагаться на бронированных РТК массой от 2 до 7 тонн. Степень роботизации транспортной машины может повышаться, на нее будут возлагаться задачи эвакуации поврежденных модулей. Впоследствии может быть внедрена более совершенная система организации связи и управления.

Таким образом, предлагаемая схема дает возможность в кратчайшие сроки разработать и принять на вооружение образец мобильного многофункционального РТК для боевого использования в составе общевойсковых формирований тактического звена, а также для охраны и обороны прибрежных, приграничных и позиционных районов.

1. С.Г. Шойгу. Выступление министра обороны на совещании с руководящим составом ВС РФ 14.01.2014.

V. Levin, B. Luskin, D. Semenov, A. Zakharov, I. Mokhov

PROCEDURE FOR DETERMINING CONFIGURATION OF THE SHIP'S AUTOMATED SYSTEM FOR CONTROL OF MULTIFUNCTIONAL UNMANNED VEHICLES OF DIFFERENT KINDS WITH ACCOUNT OF LIMITING CONDITIONS DEFINED BY MARINE OPERATION

CDB ME «RUBIN», Saint-Petersburg
neptun@ckb-rubin.ru

В.Д. Левин, Б.А. Лускин
Д.О. Семенов, А.И. Захаров, И.А. Мохов

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОБЛИКА КОРАБЕЛЬНОЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫМИ НЕОБИТАЕМЫМИ АППАРАТАМИ РАЗЛИЧНОГО ТИПА С УЧЕТОМ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ, ОПРЕДЕЛЯЕМЫХ МОРСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИЕЙ

ОАО «ЦКБ МТ «Рубин», Санкт-Петербург
neptun@ckb-rubin.ru

Основные тезисы:

- определение весовых коэффициентов ограничивающих факторов (граничных условий), имеющих место при проектировании систем, аппаратура которых предназначена для размещения на морских подвижных платформах;
- формирование структуры системы управления на основе анализа функциональных зон (доменов), определяемых моделью (режимами, функциями) использования аппаратов;
- формирование (определение, задание) конструктивных и эргономических требований к рабочим местам операторов, определение необходимости централизованного или распределенного (локального) управления необитаемыми аппаратами различных типов;
- сравнительный многофакторный анализ, учитывающий такие аспекты как объем выполняемых системой функций, масса и энергопотребление аппаратуры, структурные и компоновочные решения, обслуживание личным составом, стоимость создания, возможность модернизации и др.

1. Формирование архитектурно-конструктивного и алгоритмического концептуальных обликов сложных морских инженерных систем, элементом которых, является необитаемый подводный аппарат, определяется различными факторами, на ранних стадиях создания системы.

На основании положений предварительной модели эксплуатации системы, разработанной, как правило, Государственным Заказчиком, бюро–проектант создает систему требований различного уровня к проектируемому объекту и транслирует их посредством выдачи частных технических заданий соисполнителям работы.

Данный механизм позволяет бюро–проектанту распределять работы по созданию различных составных частей системы между соисполнителями с обеспечением безусловного выполнения требований тактико-технического задания, а также, что наиболее важно, контролировать сохранение целостности замысла создания системы на всем протяжении выполнения работ.

2. При проектировании систем управления, размещаемых на морских подвижных платформах (МПП, далее - платформа), необходимо учитывать различные ограничивающие факторы, связанные как с конструктивными особенностями платформ, так и с требованиями к организации службы. К основным конструктивным особенностям, которые являются ограничивающими факторами, относятся в порядке убывания весовых коэффициентов:

- малый объем и, как следствие, большая затесненность помещений, в которых будет размещаться аппаратура системы,
- необходимость минимизации кабельных связей, электропотребления, тепловыделения аппаратуры,
- необходимость обеспечения требований по конструктивной защищенности аппаратуры, вероятности ее безотказной работы в условиях носителя, в т. ч. при наличии внешних воздействий.

К требованиям организации службы относятся:

- наличие постов управления, применение средств коммуникации, оповещения и т.д.
- наличие удаленных (распределенных по платформе) постов (мест) обслуживания как самих НПА, так и технических средств их применения,
- минимизация количества личного состава, необходимого для выполнения функций управления и обслуживания аппаратуры управления НПА,

– необходимость обеспечения координации функционирования л/с, ответственного за применение НПА, с л/с платформы.

3. Формирование структуры системы управления производится бюро-проектантом на основании анализа реализуемых НПА функций, разделения их на функциональные зоны (домены), определение одинаковых (сходных) доменов для различных НПА. Основными режимами работы системы управления являются:

– формирование задания на выполнение различных операций (миссий),
– обеспечение ввода-вывода информации для подготовки НПА к работе, загрузка заданий, проверка готовности НПА,
– управление операциями вывода НПА с платформы и его возвращения на платформу, включая управление общесудовыми системами,
– обеспечение связи, либо наблюдения за НПА при выполнении миссии, передача информации на средства отображения и регистрации,
– обеспечение дистанционного управления НПА,
– выгрузка и обработка информации, накопленной НПА при выполнении миссии, визуализация в виде 3-D моделей результатов миссии.

Для реализации указанных режимов аппаратура управления может быть разделена на следующие функциональные зоны (домены):

– аппаратура обеспечения взаимодействия «оператор – система управления»,
– аппаратура обработки информации,
– аппаратура управления техническими средствами,
– коммутационная аппаратура.

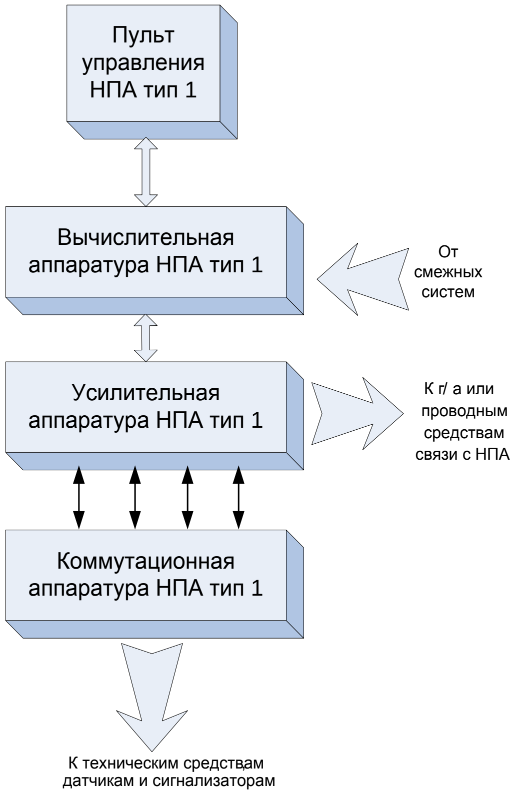


Рис. 1. Типовая структура системы управления НПА

Более детальный анализ функционального назначения НПА различных типов показывает, что такие домены как «аппаратура взаимодействия оператор - система» и «аппаратура обработки информации» практически идентичны для разных типов НПА как по конструктивному исполнению, так и по функциональным (вычислительным) характеристикам, а домены «аппаратура управления ТС» и «коммутационная аппаратура» будут иметь отличия, как в составе так и в функциональном назначении.

Например, в домен «управления ТС» ТНПА будет входить аппаратура телеуправления (лебедки, кабельные катушки, устройства передачи электроэнергии и др.), в отличие от аналогичного домена АНПА.

Таким образом, учитывая необходимость выполнения требований по минимизации аппаратурного состава, уменьшения общего электропотребления, количества кабельных связей и для исключения дублирования функций в аппаратуре управления, однотипные домены объединяются в единый блок, обеспечивающий применение НПА разных типов.

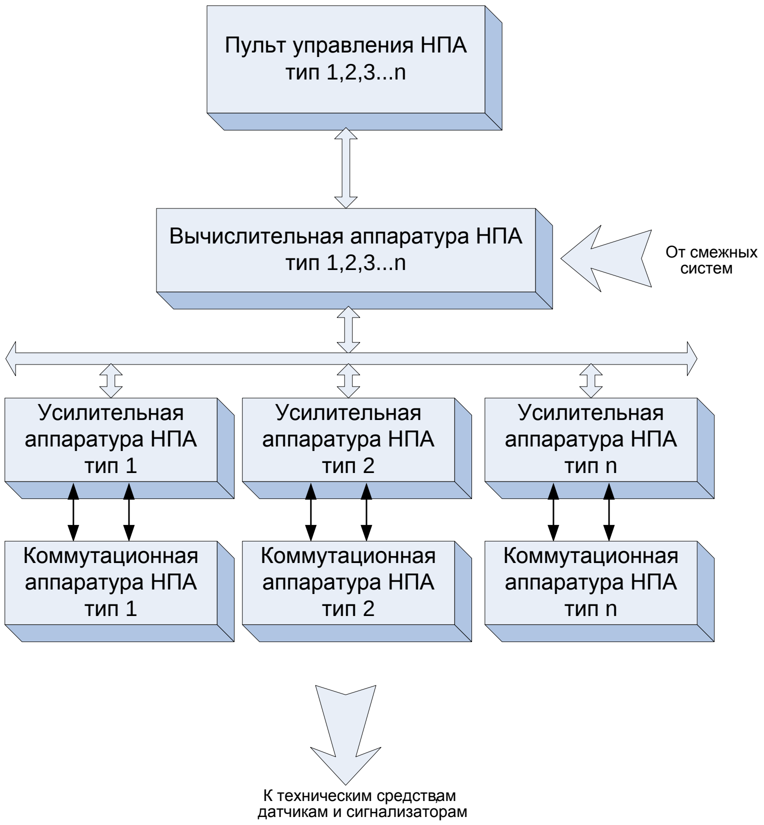


Рис. 2. Оптимизированная структура системы управления НПА

4. После формирования начальной структуры системы, в соответствии с необходимостью учета требований организации службы личного состава морской подвижной платформы, решаемых задач при применении различных типов НПА, бюро-проектантом определяются конструктивные и эргономические требования к постам управления.

Одним из факторов, имеющих большое значение при формировании облика системы управления, является необходимость определения «топологических» требований к структуре управления. Наличие разнотипных НПА, учет зон их размещения на платформе, необходимость их технического обслуживания, организация вахт и смен личного состава являются условиями определения структуры управления на основе распределенной сети (локального управления), либо применения принципов централизованного управления и создания единого поста управления.

Основными преимуществами распределенного (локального) управления разнотипными НПА являются:

– сокращение протяженных линий связи и управления,
– создание аппаратуры, учитывающей конструктивные особенности как конкретного типа НПА, так и условий его размещения, обслуживания и применения,
– возможность непосредственного наблюдения за НПА при его обслуживании и хранении.

Основными же недостатками являются:

– увеличение количества однотипной аппаратуры пропорционально количеству типов НПА,
– необходимость организации нескольких постов и, как следствие, увеличение личного состава,
– отсутствие унификации в схемотехнических, конструктивных и программных решениях,
– усложненная коммуникация между операторами разнотипных НПА,
– отсутствие единого информационного пространства.

Учитывая технические возможности современных средств ЦВТ, а также перспективы развития как средств вычислительной техники, так и средств отображения информации, связи и коммуникаций, и принимая во внимание перечень задач, в т. ч. комплексных, решаемых разнотипными НПА, более технически и организационно обоснованным является структура системы централизованного управления НПА.

Данная структура базируется на иерархическом принципе построения, где на верхнем уровне управления находится аппаратура домена «взаимодействия оператор – система», на втором уровне – аппаратура домена «обработки информации», на третьем уровне – аппаратура доменов «управление ТС» и «коммутация». При этом первые два домена «топологически» объединены в рамках единого центрального поста управления НПА, а аппаратура доменов нижних уровней распределена по платформе в зависимости от размещения ТС и НПА.

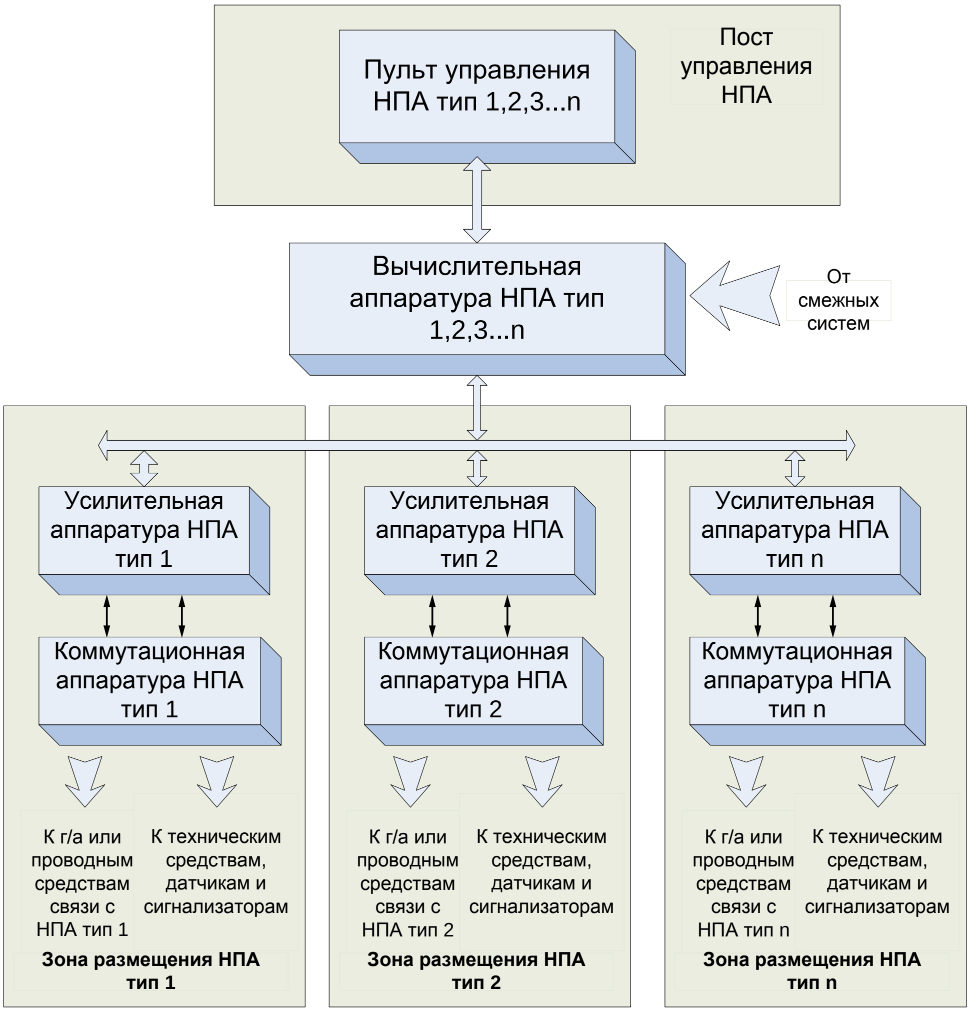


Рис. 3. Топологическая структура системы управления НПА

Исходя из принятого решения о централизованной структуре системы управления, формируются конструктивные, в т. ч. эргономические, требования к аппаратуре доменов верхних уровней. Аппаратура, обеспечивающая взаимодействие «оператор – система», объединяется в пульты управления. Эргономические и конструктивные решения, заложенные в основу создания пультов управления, должны обеспечивать:

– размещение современных средств отображения информации – цветные мониторы высокого разрешения с возможностью 3-D изображения и сенсорного управления,
– размещение многофункциональных органов управления пространственным положением НПА («джойстики»), с возможностью выбора функционального назначения отдельных органов управления,
– размещение многофункциональных средств ввода информации – сенсорных мониторов с виртуальными функциональными клавиатурами,
– размещение средств коммуникации (связи),
– возможность длительного нахождения оператора за пультом,
– возможность соединения пультов в единый пультовой комплекс (единый пульт управления),
– возможность коммуникации пультов с дополнительными средствами отображения информации коллективного пользования, в т. ч. со средствами визуализации на основе 3-D изображения, голограмм и др.

Разработка аппаратуры домена «обработки информации» осуществляется на основе использования современных и перспективных средств ЦВТ, а также архитектуры распределенных сетей на базе интерфейсов высокого уровня (Ethernet). Данный принцип позволяет сократить количество вычислительных приборов, обеспечить необходимый уровень резервирования вычислительных мощностей, обеспечить «потоковое» решение как общих (комплексных) задач формирования алгоритмов управления, отображения информации, обработки первичной информации, так и частных задач для каждого НПА по управлению им и его ТС.

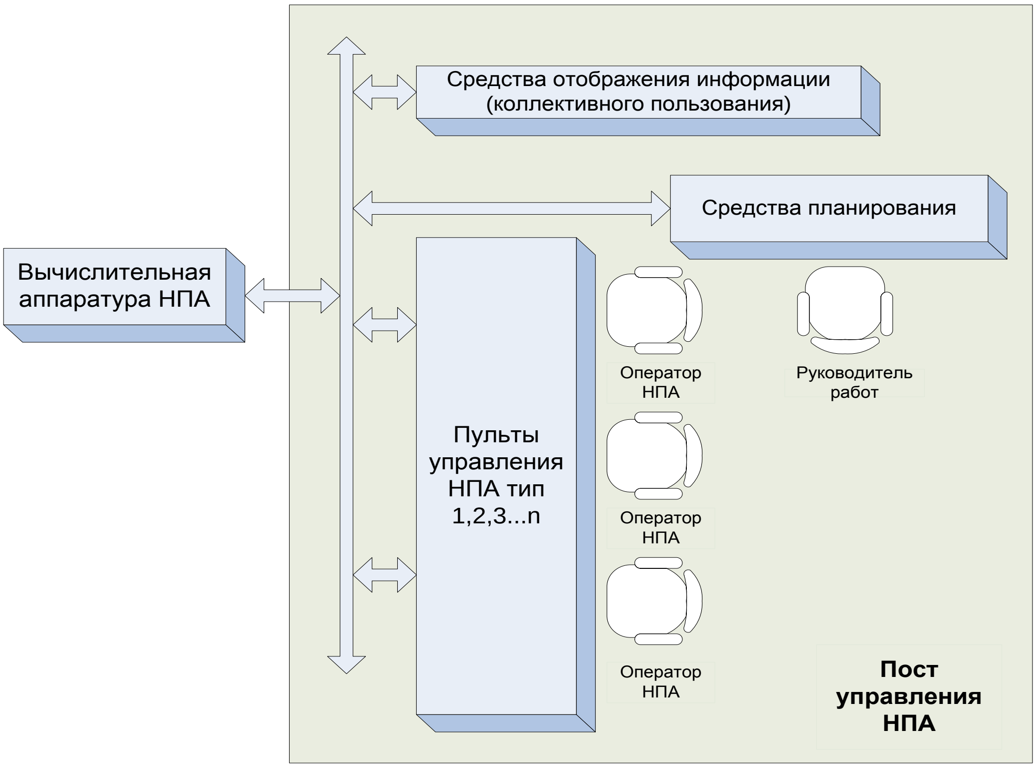


Рис. 4. Типовая структура поста управления НПА

Созданная на базе указанных выше принципов аппаратура управления верхнего уровня позволяет сформировать единый пост управления НПА и обеспечивает решение не только частных задач управления каждым НПА, но и следующие комплексные задачи, связанные с применением разнотипных НПА:

– комплексное отображение информации, получаемой от НПА, в том числе информации от разнотипных средств наблюдения (фото-, видео-, гидроакустических, электромагнитных и других),
– отображение взаимного расположения платформы-носителя, НПА, исследуемых объектов, в том числе на фоне навигационной карты,
– обеспечение единства и синхронизации информации, получаемой от смежных систем платформы в обеспечение применения НПА,
– обеспечение качественной звуковой и визуальной коммуникации операторов НПА, обслуживающего НПА и ТС личного состава, а также коммуникацию поста управления НПА с центральным (главным) постом управления платформы.

Таким образом, выполняются основные базовые принципы создания «единого информационного пространства», что позволяет, в том числе, оптимизировать количество личного состава (персонала) за счет возможности объединения (совмещения) постов управления НПА различных типов.

5. Создание системы управления НПА на основе централизованной структуры управления позволяет организовать единый пост управления НПА различных типов, оптимизировав состав аппаратуры управления.

При организации данного поста выявлено дополнительно новое качество, не рассматривавшееся изначально в проекте. Создание единого информационного пространства в рамках отдельного поста управления позволяет организовать в этом посту место руководителя работ.

Организация пространства поста управления при использовании унифицированных пультовых конструктивов, единых технических решений в части органов отображения информации, использования дополнительных средств визуализации коллективного пользования, позволяет разместить в посту управления автоматизированное рабочее место руководителя работ (АРМ РР).

При решении комплексных задач научно-исследовательских или поисковых работ с использованием различных типов многофункциональных НПА, имеющихся на борту платформы, данный АРМ позволяет:

– обеспечить доступ руководителю работ ко всему объему информации,
– вывести на любое средство визуализации необходимую ему информацию,
– обеспечить непосредственное руководство операторами и другим персоналом, эксплуатирующим НПА, тем самым повышая качество, надежность и оперативность принятия организационно-управленческих решений.

6. Выводы:

Применение данной методики позволило на ранних стадиях проектирования сформировать систематизированные требования к облику корабельной автоматизированной системы управления многофункциональными необитаемыми аппаратами различного типа с учетом различных граничных условий.

На основе анализа функционального назначения различных типов НПА, определения основных граничных условий, выполнены следующие работы:

– определена структура системы, оптимизированная по составу аппаратуры и принципам ее размещения,
– сформированы конструктивные и эргономические требования к пультам управления, включая требования по органам управления и отображения информации,
– определена возможность создания в рамках системы автоматизированного рабочего места руководителя работ,
– сформулированы основные принципы организации единого поста управления,
– определены основные алгоритмы эксплуатации (использования) НПА различных типов в обеспечение выполнения поставленных задач.

Изложенные принципы реализуются в настоящее время ОАО «ЦКБ МТ «Рубин» при разработке многофункциональных комплексов на основе необитаемых подводных аппаратов различных типов и классов, в том числе, используемых с морских подвижных платформ.

Актуальность поставленных задач подтверждается как повышенным интересом Государственного Заказчика к созданию морской техники данного вида, так и многочисленными публикациями о разворачивании аналогичных работ за рубежом.

Проведенный анализ информации, содержащийся в открытых источниках, показал, что проектирование аналогичных систем развивается в том же направлении.

Например, ниже приведен пост управления АНПА разных типов, созданный австралийским Центром полевой робототехники (Australian Center for Field Robotics) и Вудсхоллским океанографическим институтом (Woods Hole Oceanographic Institution).

Рис. 5. Пост управления НПА (Австралия)

Рис. 6. Пост управления (Швеция)

С учетом вышеизложенных подходов, а также возможности дальнейшего развития методики, описанной в настоящей статье, можно говорить о формировании теоретической, проектно-конструкторской и технологической основы для создания в среднесрочной перспективе комплексов автономных необитаемых морских подвижных платформ различного назначения, которые будут являться безэкипажной альтернативой эксплуатирующимся и создающимся в настоящее время обитаемым объектам морской техники.

S. Tsarichenko, A. Ivanov, Yu. Osipov, A. Kartenichev, V. Ershov

FEATURES OF USE OF UNMANNED AERIAL VEHICLES IN INTERESTS OF THE EMERCOM OF RUSSIA

FGU VNIIPO of EMERCOM of Russia
tsarichenko_s@mail.ru

С.Г. Цариченко, А.В. Иванов, Ю.Н. Осипов, А.Ю. Картеничев, В.И. Ершов

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ В ИНТЕРЕСАХ МЧС РОССИ

ФГБУ ВНИИПО МЧС России
tsarichenko_s@mail.ru

Основными задачами, решаемыми силами МЧС России с использованием беспилотных летательных аппаратов (БЛА) являются поисково-спасательные и аварийно-восстановительные операции, а также пожаротушение протяженных открытых очагов. При этом выполняются следующие виды операций:

- поиск объектов на заданной территории;
- определение точных координат объектов поиска и границ района ЧС;
- мониторинг района катастрофы;
- использование БЛА в качестве ретранслятора в зонах ЧС; обеспечение сотовой связью мобильных групп (спасателей); передача сигналов управления наземной группировке робототехнических средств;
- информационное сопровождение и наведение на объекты мобильных поисковых групп;
- видео, ИК- и фотосъемка;
- контроль ледовых заторов и паводковой обстановки;
- экологический мониторинг водных поверхностей;
- проведение замеров в районе химических и радиационных аварий;
- мониторинг состояния линейных объектов (трубопроводов, русел рек, дорог, ж/д полотна и т.п.);

– поиск пострадавших при сходе снежных лавин;
– обеспечение поиска подводных объектов (сброс радиобуев).

При визуальном поиске (с использованием видео и ИК- камер) БЛА самолетного типа целесообразно выполнять полет на высоте не выше 500-600 м, вертолетного – на высоте 200-300 м над рельефом местности (препятствиями, водной поверхностью).

Высота полета может уточняться в зависимости от особенностей района поиска, метеорологических условий, уровня подготовки операторов и дальности обнаружения объектов в условиях фактической метеовидимости.

Визуальный поиск над густым лесом должен начинаться с полета на большой высоте, обеспечивающей общий просмотр заданного района в целях обнаружения очагов пожара или дымов, а также для установления визуального контакта с потерпевшими бедствие.

Расстояние между маршрутами осмотра местности должно быть не более двух высот полета. Над участками местности с густой растительностью целесообразно выполнить дополнительный просмотр местности «с виража», либо уменьшить расстояние между галсами и снизить высоту поиска до минимальной безопасной высоты полёта в данном районе.

В полетах на поиск в горах следует выполнять детальный осмотр ущелий, долин, русел горных рек. Осмотр горных вершин необходимо производить со всех сторон.

В целях тщательного просмотра сильнопересеченной местности разведку следует осуществлять неоднократным пролетом участка с разных направлений.

При обнаружении терпящих бедствие людей необходимо определить и зафиксировать:

– время обнаружения и координаты потерпевших бедствие;
– наблюдаемое состояние и положение потерпевших бедствие;
– информацию, подаваемую потерпевшими бедствие с помощью визуальных сигналов и знаков;
– погоду в районе бедствия;
– данные о рельефе и состоянии земной (водной) поверхности (волнении моря, ледовой обстановке), на которой находятся аварийные объекты и люди, потерпевшие бедствие;
– сведения о проходимости местности;
– тип и расположение средств передвижения, которые могут быть использованы при оказании помощи;
– меры, которые уже были предприняты для оказания помощи (десантирование спасательно-поисковой группы, выброска аварийно-спасательного имущества и снаряжения и т. д.);
– данные об ущербе, нанесенном на местности.

При проведении аварийно-восстановительных операций с участием БЛА необходимо оценить размер зоны поражения и ущерба нанесенного в результате ЧС с целью координации действий основных пожарно-спасательных формирований.

Одним из наиболее распространенных способов применения БЛА является их участие в ликвидации открытых протяженных очагов пожара, в части поиска возможных очагов горения, определения динамики и направленности развития пожара, а также координации действий пожарных подразделений. В частности БЛА рассматриваются как эффективное средство видеонаблюдения, целеуказания и управления наземной группировкой РТС, работающей в зоне повышенного риска, обусловленного возможностью радиационно-химического и осколочно-фугасного поражения.

Поиск очагов возгорания необходимо проводить путём полета по заданному маршруту или облета района возможного возникновения пожаров, а также галсированием (барражированием) БЛА в предполагаемом районе визуально и с помощью технических средств (ТВ, ИК- систем и т.п.).

Разведка представляет собой совокупность мероприятий, проводимых в целях сбора информации о пожаре для оценки обстановки и принятия решений по организации пожаротушения.

При организации воздушной разведки руководитель тушения пожара должен определить задачи и направления проведения воздушной разведки, потребное количество вылетов БЛА и их периодичность (по вызову или в соответствии с плановой таблицей), а также установить порядок передачи полученной в ходе воздушной разведки информации.

При проведении разведки, в зависимости от характера объекта пожара, устанавливаются:

– местонахождение людей; наличие и характер угрозы им от огня и других факторов пожара; пути, способы и средства спасания (защиты) людей, а также, необходимость защиты (эвакуации) имущества;
– наличие и возможности вторичных проявлений опасных факторов пожара, в том числе обусловленных особенностями технологии и организации производства на объектах пожара;
– места и параметры очагов пожара, а также возможные пути распространения огня;
– местонахождение ближайших водоисточников и возможные способы их использования;

– состояние и поведение строительных конструкций зданий (сооружений), рациональные места их вскрытия и разборки;
– возможные пути ввода сил и средств подразделений для тушения пожаров и проведения аварийно-спасательных работ, связанных с тушением пожара, а также иные данные, необходимые для выбора решающего направления действий.

Воздушная разведка пожаров выполняется различными способами.

БЛА могут совершать полеты непосредственно над объектами либо в стороне от них на удалении, обеспечивающем попадание объектов пожаротушения в полосу обзора применяемого оборудования.

Выход на объект разведки и уход от него могут осуществляться как с маневром по направлению и (или) высоте, так и без маневра. Маневр используется для выбора наиболее целесообразного направления и (или) высоты ведения разведки, выполнения повторного захода или для выхода на последующий объект.

Направление захода БЛА на объект при определении очага пожара целесообразно выбирать с подветренной стороны для избегания попадания в дымовой шлейф.

Основными способами ведения воздушной разведки очагов возгорания являются:

– выполнение воздушной разведки проходом над объектом;
– выполнение воздушной разведки несколькими проходами или барражированием над объектом;
– зависание в районе очага возгорания (для БЛА вертолетного типа);
– полет по заданному маршруту или прочесывание (при поиске лесных пожаров).

Способ воздушной разведки “*полет проходом над объектом*” (Рис. 1) применяется, как правило, при разведке пожаров:

– одного малоразмерного объекта с заранее известными координатами;
– нескольких рядом стоящих известных малоразмерных объектов;
– линейных объектов (определение границ возгораний при пожарах больших масштабов, например, трубопроводов, лесных массивов).

Способ *«воздушная разведка повторными проходами или барражирование над объектом»* (Рис. 2) применяется:

– для уточнения состояния ранее обнаруженного объекта пожаротушения;
– для повышения вероятности обнаружения очага возгорания;
– при разведке площадных объектов (полос местности) одним БЛА.

В отдельных случаях данный прием может применяться как для определения изменения состояния объекта воздушной разведки, так и наблюдать динамику изменения параметров пожара в различные моменты времени.

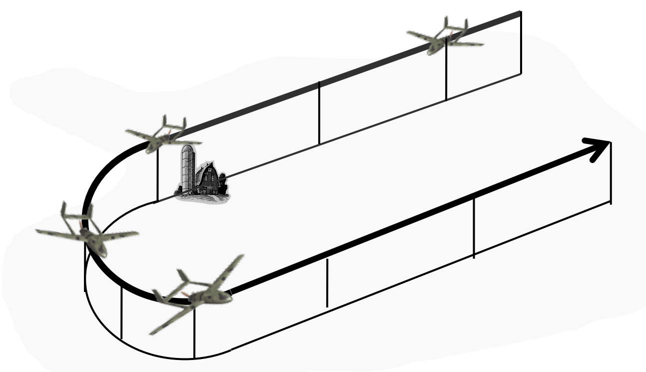


Рис. 1. Воздушная разведка проходом над объектом пожаротушения

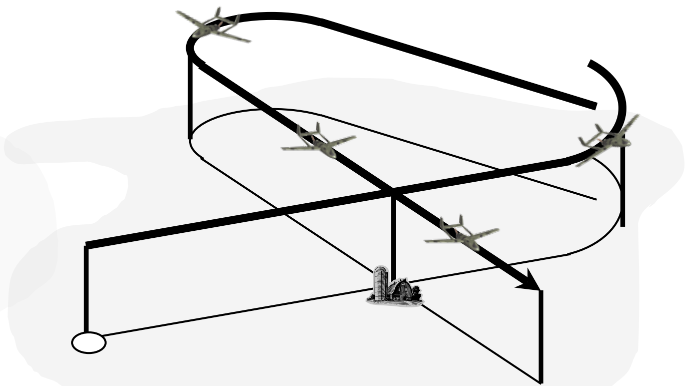


Рис.2. Воздушная разведка повторными проходами над объектом пожаротушения

При выполнении проходов один из них выполняется на меньшей высоте для получения более крупного масштаба изображения, другой – на большей высоте для захвата всех элементов объекта и окружающей местности.

БЛА вертолетного типа имеют возможность *зависания над объектом* или районом очага возгорания с выбором оптимального ракурса наблюдения. Этот прием позволяет осуществлять детальную разведку сложных по архитектуре объектов, например АЭС. Кроме того, при спасении людей с верхних этажей при пожарах в высотных зданиях (сооружениях) БЛА вертолетного типа могут быть специально оборудованы для доставки устройств спасания, средств связи, а также малогабаритных средств пожаротушения.

Способ «*Прочесывание*» (Рис. 3) должен применяться при воздушной разведке пожаров на большой площади и равнинной местности, такой как, лесные массивы, тундра, морские акватории. Маршрут полета задается зоной барражирования, представляющей собой прямоугольник с заданными сторонами и шагом барражирования. Шаг барражирования выбирается таким, чтобы обеспечить просмотр всего района с гарантированным перекрытием полос захвата местности разведывательным оборудованием БЛА.

Воздушная разведка конкретных объектов ведется с высот, обеспечивающих достаточную полноту и достоверность получаемой об аварийном объекте информации и требуемую точность определения его координат.

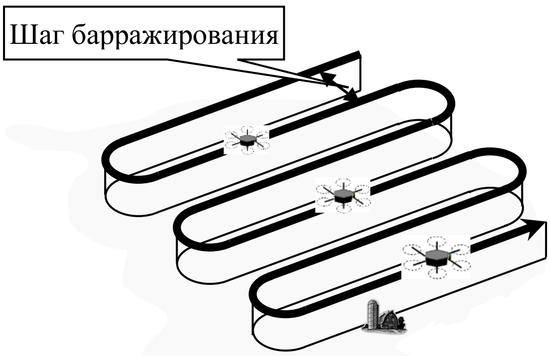


Рис. 3. Воздушная разведка повторными «прочёсыванием»

Основными маневрами для повторного выхода на объект пожара являются: два разворота на 180°, стандартный разворот, разворот на 270° и возврат на предшествующий поворотный пункт маршрута (ППМ) (Рис. 4).

При организации разведки и поиска очагов возгорания с использованием БЛА в горной местности необходимо учитывать:

– резкие колебания условий полёта в течение суток и при изменении освещённости склонов гор;
– экранирующее влияние гор на распространение радиоволн;
– условия повышенной турбулентности и сильных восходящих и нисходящих потоков воздуха.

При планировании полетов БЛА в горной местности особое внимание необходимо уделять выбору маршрутов и профилей полетов, соблюдению условий радиовидимости между БЛА и НПУ.

Маршруты полетов выбираются в обход господствующих высот, а профиль полета – в соответствии с профилем местности по маршруту.

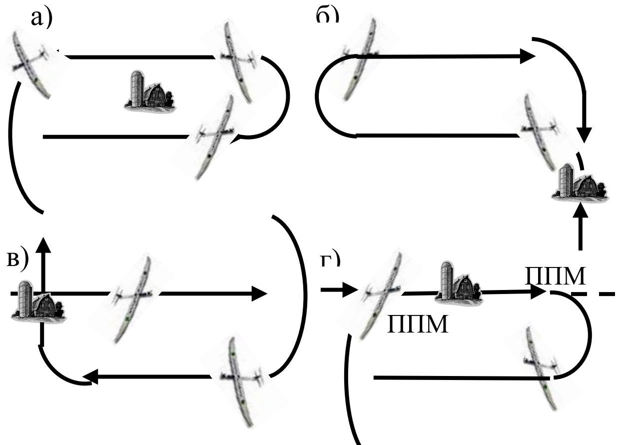


Рис. 4. Маневры повторного выхода на объект пожара:
а – два разворота на 180°;
б – стандартный разворот;

Необходимо учитывать, что распространение дымового шлейфа от источника пожара в складках местности (например, вдоль горных ущелий) затрудняет безопасное выполнение полета и, как правило, не соответствует направлению на объект пожара.

На организацию и выполнение воздушной разведки пожаров в пустынной местности оказывают влияние:

– частые ветры с перемещением больших масс песка, затрудняющие визуальную ориентировку и эксплуатацию наземной и авиационной техники;
– возможное образование в приземном слое стелющегося на большой площади дыма, затрудняющего определение места его источника и усложняющего процесс пилотирования БЛА в полете без визуального контакта с ним;
– вероятность более сильного и продолжительного заражения воздуха и местности радиоактивными или химическими веществами при пожарах и авариях на опасных объектах.

На условия ведения разведки пожаров в северных районах особое влияние будут оказывать:

– частые и резкие изменения погоды, сопровождающиеся сильными ветрами и метелями;
– продолжительность полярного дня и ночи;
– низкие температуры воздуха в течение большей части года;
– непостоянные и значительные величины магнитных склонений, частые ионосферные и геомагнитные возмущения (бури);
– наличие обледенения БЛА в воздухе и на земле;

– сокращение продолжительности полета БЛА при эксплуатации аккумуляторных батарей в условиях низких температур;
– сложность подготовки БЛА к старту (запуску) в условиях низких температур;
– сложность передвижения подразделений, доставки БЛА на стартовые позиции и эвакуации с мест посадки;
– трудность производства инженерных работ по оборудованию позиционных районов;
– сложность привязки позиций пусков из-за ограниченного количества ориентиров и пунктов привязки.

При организации воздушной разведки пожаров в лесистой местности следует учитывать, что в утренние и вечерние часы возможно образование туманов, которые смешиваясь с дымами, могут затруднять обнаружение очагов возгораний. Эффективная дистанция обнаружения «дым – точки» на высоте полета в 600 м не превышает 6-8 км при площади пожара в 0,1-0,2 га, что должно учитываться при построении маршрута патрулирования.

Для определения с воздуха вида пожара служат признаки:
– низового – горение происходит под пологом древостоя или на открытой местности, площадь пожара имеет вытянутую форму с извилистыми границами, огонь под пологом древостоя виден обычно местами, цвет дыма беловатый;
– верхового – площадь пожара имеет сильно вытянутую форму, видны горящие кроны деревьев, огонь хорошо заметен с высоты в 600 м, цвет дыма темный;
– торфяного или подземного при применении видеокамеры оптического диапазона – границы недавно возникшего пожара плохо заметны, дым поднимается по всей площади пожара, огонь не виден;
– на старом пожарище границы выгоревшей площади хорошо заметны, дым сосредоточен на периферии пожара, много повалившихся деревьев, огонь практически не виден.

Для определения интенсивности низовых пожаров служат следующие признаки:
– при сильной интенсивности пожара – пламя видно с высоты полёта в 200 м по всему фронту пожара;
– при средней интенсивности пожара – пламя с высоты в 200 м видно лишь на отдельных участках пожара;
– при слабой интенсивности пожара – огонь с высоты 200 м практически незаметен.

При использовании видеокамер ИК-диапазона (тепловизоров) границы пожара видны более-менее отчетливо. Более светлые тона соответствуют участкам с высокой температурой горения.

Общий осмотр пожара целесообразно производить с высоты полёта БЛА в 600 - 800 м. Установив место и вид пожара, оператор должен засечь его координаты, нанести границы на карту (карту-схему) района работ. Для детального осмотра очагов возгорания высота полета БЛА снижается до 200-300 м. Производится определение и описание характера насаждений (состава, полноты, возрастной группы – молодняки, средневозрастные, спелые деревья и кустарники). Если пожар распространяется на непокрытых лесом площадях – указывается их категория. Устанавливается наличие или отсутствие на пожаре людей, техники.

При мониторинге пожарной ситуации оператор должен установить наиболее опасные направления распространения пожара, определить тактику тушения пожара, естественные преграды, которые могут быть использованы для остановки огня, а так же потребное количество технических средств и людей для пожаротушения. При этом следует учитывать вероятное распространение пожара до прибытия сил и средств пожаротушения.

В случае, когда БЛА не может в течение длительного времени выполнять задачу определения мест возгорания из-за ограничения его пространственно-временных возможностей по любой причине (недостаточный заряд аккумуляторов, малый остаток топлива и т.п.), необходимо произвести повторный запуск БЛА или организовать их сменяемость, а в случае значительного удаления очага возгорания от подразделений воздушно-разведывательного комплекса – выбрать более близкую площадку для старта и посадки БЛА.

В зависимости от вида применяемого бортового оборудования (аппаратуры) комплексы с БЛА обеспечивают мониторинг объектов и территорий следующими способами: воздушным фотографированием, телевизионным, инфракрасным зондированием и, в перспективе, – радиолокационным зондированием. Способы дистанционного зондирования могут применяться как раздельно, так и комплексно.

Воздушное фотографирование и телевизионное зондирование ведутся днем (с ограничением по минимальной освещенности земной поверхности, допустимой по техническим характеристикам оборудования), инфракрасное – днем и ночью.

При телевизионном, инфракрасном зондировании осуществляется передача информации по радиоканалу с борта БЛА на наземный пункт управления (НПУ). Передача информации по радиоканалу позволяет получить данные в масштабе времени, близком к реальному. Зондирование в этом случае может вестись на протяжении всего полёта при условии обеспечения радиовидимости между БЛА и НПУ).

Данные воздушного фотографирования на борту БЛА фиксируется на цифровом носителе. Протяжённость участка зондирования в этом случае определяется объемом памяти носителя информации.

Подразделениями БЛА могут применяться способы практических действий, содержащие один или совокупность следующих основных приемов:

а) в зависимости от распределения усилий по времени и количества используемых БЛА:
– полеты одиночных БЛА;
– одновременное выполнение задачи (полёты) несколькими БЛА.

Полеты одиночных БЛА применяются при решении небольших по объему и последовательно возникающих задач, например, для дистанционного мониторинга отдельных объектов, а также, при необходимости, для длительного и систематического наблюдения за ними. Полеты одиночных БЛА могут объединяться единым замыслом, - когда полет последующего БЛА будет зависеть от результатов, полученных предыдущим. Одновременный полет нескольких БЛА выполняется, как правило, при необходимости в короткие сроки обследовать большие пространства, получить данные о значительном количестве объектов или более полные данные об одном отдельном объекте. Одновременное применение БЛА с различным оборудованием в составе полезной нагрузки позволяет повысить достоверность полученных данных. Количество БЛА, одновременно находящихся в воздухе, зависит от количества ТПУ, НПУ, НПО, наличия подготовленных операторов, а также количества радиоканалов передачи получаемой информации. При ограниченном количестве информационных радиоканалов должен предусматриваться разнос по времени передачи данных разными БЛА; или пуски одиночных БЛА должны выполняться с интервалами, обеспечивающими последовательный прием информации от каждого из них.

Для исключения из практики подобных ограничений с целью повышения эффективности применения БЛА предлагается использовать принцип коллективного управления.

S. Lysyj

SCIENTIFIC PROBLEMS AND PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF SPECIAL-PURPOSE (SPACE) ROBOTICS

FSUE TSNIImash, Moscow region, Russia
corp@tsniimash.ru

С.Р. Лысый

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ РОБОТОТЕХНИКИ СПЕЦИАЛЬНОГО (КОСМИЧЕСКОГО) НАЗНАЧЕНИЯ

Федеральное государственное унитарное предприятие
«Центральный научно-исследовательский институт машиностроения», г. Королёв
corp@tsniimash.ru

Специальная робототехника представляет собой стремительно развивающееся перспективное направление, охватывающее как проектирование, разработку и производство, так и эксплуатацию робототехнических систем, предназначенных для использования в гражданской и военной сфере, в том числе и в космической отрасли. Разработка роботов во многом зависит от прогресса сопутствующих базовых технологий, таких как технологии точного позиционирования, техническое зрение, биомеханические устройства, искусственный интеллект и др. Прорывные достижения в ключевых технологиях придают импульс развитию роботов.

Несмотря на заметные успехи и значительные перспективы, пока робототехника испытывает затруднения с привлечением инвестиций в силу длительного цикла и высокой стоимости разработок. Основными проблемами ее развития являются сложность прикладных научно-технических задач, междисциплинарность робототехники и незрелость необходимых базовых технологий. Интерес частных инвесторов также сдерживается такими факторами, как высокие риски и низкая ожидаемая доходность. Поэтому важную роль в развитии робототехники в большинстве промышленно развитых стран мира играет государство. Именно благодаря продуманной промышленной политике, активному финансированию НИОКР и программам поддержки стартапов США и ряду стран Европы удалось добиться заметных результатов в данной отрасли.

Что касается нашей страны, безусловно, Россия обладает существенным потенциалом в области специальной робототехники. Уже в среднесрочной перспективе уровень развития отечественной робототехники будет оказывать существенное влияние на оборонный потенциал страны и производительность труда в основных отраслях промышленности. Решение этих задач требует комплексного развития робототехники, включая подготовку соответствующих кадров, разработку сопутствующих технологий и производство комплектующих.

Робототехника специального назначения, во многом использующая накопленный в советские годы потенциал, является относительно конкурентоспособным направлением в нашей стране. Однако зависимость от ключевых заказчиков и недостаточное финансирование являются сдерживающими факторами развития робототехники специального назначения.

По оценкам ряда специалистов отставание отечественных разработок от передовых зарубежных стран по созданию робототехнических комплексов специального назначения составляет 10-15 лет. Работы по роботизации военной и космической отрасли проводятся в России в рамках отдельных немногочисленных проектов, которые, кроме того, не имеют определенной направленности, что, в свою очередь, объясняется отсутствием должной координации работ. Несогласованность действий отечественных разработчиков по созданию робототехнических систем специального назначения вследствие отсутствия единой целевой программы влечет за собой параллелизм и дублирование при проведении НИОКР, что ведет к снижению эффективности их результатов.

В настоящее время в России разработками в области специального робототехники занимаются ведущие научно-исследовательские институты и промышленные предприятия: ЦНИИ робототехники и технической кибернетики, МГТУ им. Н.Э. Баумана, НИЦ робототехники ВНИИПО МЧС России, ВНИИ Трансмаш и др.

В последние два-три года тема робототехники специального, в том числе космического, назначения стала рассматриваться как принципиально важная для дальнейшего развития оборонного комплекса страны. С 1 июня 2013 года при Минобороны России начал действовать Главный научно-исследовательский испытательный центр робототехники, который в феврале 2014 года распоряжением Президента РФ был наделен статусом федерального государственного бюджетного учреждения. Также в 2013 году при Военно-промышленной комиссии (ВПК), возглавляемой заместителем Председателя Правительства РФ Рогозиным Д.О., была создана межведомственная рабочая группа «Лаборатория робототехники», которая выполняет роль центра компетенции и интеграционной площадки между заказчиками, наукой и промышленностью.

Для Федерального космического агентства тема специальной (космической) робототехники также является одной из приоритетных, так как для получения конкурентных преимуществ и сохранения лидирующих позиций в пилотируемой космонавтике необходима разработка и внедрение инновационных решений, которые помогут снизить стоимость эксплуатации пилотируемых космических аппаратов и преодолеть ограничения, накладываемые человеческим фактором. Выполнение работ в открытом космосе всегда сопряжено с высоким риском для жизни космонавта ввиду опасности повреждения скафандра неосторожными действиями или мелкими метеоритами. Кроме того, это чрезвычайно затратная процедура с точки зрения эксплуатации космической станции. Решением данных проблем является внедрение роботов при выполнении несложных, но опасных операций при внутри- и внекорабельной деятельности, а в перспективе при выполнении операций на поверхности Луны и других планет.

Основные направления использования космической робототехники (Рис. 1):

- контроль состояния обслуживаемых объектов;
- перестыковка модулей космических станций и кораблей;
- монтажно-демонтажные работы;
- парирование нештатных ситуаций;
- проведение ремонтно-восстановительных работ;
- обслуживание целевых и служебных систем космической станции;
- строительство защитных сооружений обитаемых планетных баз;
- техническое обслуживание элементов автоматических планетных баз;
- обеспечение внутри- и внекорабельной деятельности;
- забор грунта с поверхности тел Солнечной системы;
- сборка крупногабаритных космических комплексов.

ФГУП ЦНИИмаш, являясь головной научно-исследовательской организацией ракетно-космической промышленности, активно ведет работы по развитию робототехники специального (космического) назначения. Специалистами нашего института определены перспективные направления разработок, по которым ведется работа в тесном взаимодействии с ведущими предприятиями и научными институтами – разработчиками робототехники: ЦНИИ РТК, МГТУ им. Н.Э. Баумана и др.

Так, в соответствии с действующей Федеральной космической программой 2006-2015 гг. проводятся научно-исследовательские работы по разработке робототехнических систем, в том числе антропоморфного типа, для пилотируемых и автоматических космических комплексов с целью автоматизации работ при внутри- и внекорабельной деятельности космонавтов, а также выполнения операций стыковки и сборки в космосе крупногабаритных конструкций. В частности, с 2011 года осуществляются работы по исследованию возможностей использования дистанционно-управляемых антропоморфных роботов для операционной поддержки деятельности космонавтов. Проведенные испытания подобного робота с участием ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А, Гагарина» показали его эффективность при выполнении наиболее типовых операций, выполняемых космонавтами на борту МКС.

Научно-технический задел, полученный в ходе выполнения указанных работ, позволяет перейти к проведению космического эксперимента по исследованию возможностей использования дистанционно-управляемого антропоморфного робота для операционной поддержки деятельности космонавтов в условиях орбитального полета.

В настоящий момент ФГУП ЦНИИмаш в рамках СЧ ОКР «ППТС» (Перспектива-ТП,ЭП) разрабатывает эскизные проекты и макетные образцы робота антропоморфного типа для поддержки внутрикорабельной деятельности космонавтов, а также робототехнического комплекса для поддержки экипажа при внекорабельной деятельности.

Использование антропоморфного робота на борту ПКК позволит успешно решать такие задачи, как автоматизированное техническое обслуживание бортовых систем и аппаратуры, аварийно-спасательные и ремонтно-восстановительные работы, а также поддержка внутрикорабельной деятельности экипажа ПКК, в части осуществления операционной, информационной и психологической поддержки космонавтов.

Разрабатываемый робототехнический комплекс для поддержки внекорабельной деятельности будет включать в себя робототехническую транспортно-манипуляционную систему, способную самостоятельно перемещаться по поручням и такелажным элементам внешней поверхности ПКК, проводить автоматизированную инспекцию внешней поверхности ПКК с возможностью осуществления ремонтно-восстановительных работ, а также подсистему технического зрения, управления и связи, обеспечивающую автоматизированную инспекцию внешней поверхности модулей корабля с необходимого расстояния.

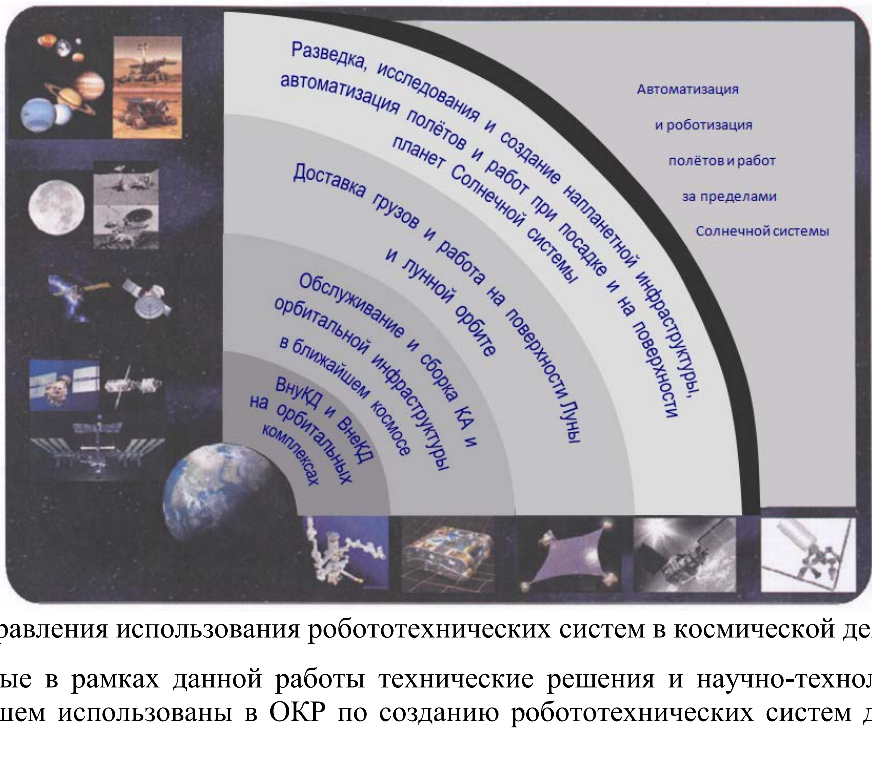


Рис.1. Направления использования робототехнических систем в космической деятельности

Разработанные в рамках данной работы технические решения и научно-технологический задел будут в дальнейшем использованы в ОКР по созданию робототехнических систем для космического применения и их составных частей, предусмотренных в проекте Федеральной космической программы 2016-2025 гг.

Что касается существующих проблем в высокотехнологичном секторе в части развития специальной робототехники, необходимо отметить следующее. В настоящее время имеет место существенное отставание в части создания отдельных электромеханических и микроэлектронных компонентов, что определяется общим состоянием дел в отечественной электронно-компонентной базе (ЭКБ). Отечественное производство исполнительных электромеханических модулей-шарниров, приводов манипуляторов, аккумуляторных батарей и др. предоставляет ограниченный ассортимент продукции, на базе которой невозможно создание современных малогабаритных робототехнических систем, в том числе для космического применения. Большая часть (до 95%) робототехнических и мехатронных компонентов, включая двигатели, контроллеры и волновые редукторы, необходимые для создания робототехнических систем специального назначения, поставляется из-за рубежа, и в целом, ставит всю отечественную робототехнику в критическую зависимость от продукции других стран, в первую очередь США, Германии, Швейцарии.

Отсутствие исполнительных элементов отечественного производства в разы замедляет разработку, проектирование и обслуживание робототехнических систем нового поколения, что приводит к постоянному увеличению отставания российской робототехники от зарубежной.

При этом специфика военной и космической деятельности накладывает жесткие требования к составным элементам подобных компонентов робототехники, которые часто не учитываются в импортных элементах.

Помимо этого, импортные комплектующие, в отличие от готовых импортных роботов, облагаются таможенными пошлинами. Это дестимулирует производство конечной робототехнической продукции на территории России. Так, большинство видов кабелей, используемых в силовых установках роботов, облагаются пошлиной от 10% до 17,5%. По подшипникам, не относящимся к сборке моторных транспортных средств и производству авиационных двигателей, пошлина составляет 10%. По зубчатым колесам и передачам пошлины в большинстве случаев 4−5%.

Создание широкого спектра робототехнических систем невозможно без использования принципов модульного построения, что требует внедрения единых стандартов на механические, электрические и программные интерфейсы таких модулей. Для этого необходимо создание системы национальных стандартов в области робототехники. Каждый стандарт должен содержать требования технического регламента (энергоэффективность, безопасность, надежность, унификация технических характеристик, система обеспечения качества продукции и т.д.) и описывать взаимодействие человека с робототехническим средством.

В целом, хочется отметить следующее.

Несмотря на все возрастающий интерес государства к роботостроению специального назначения, отсутствие целостной политики и продуманной системы поддержки, а также рассогласованность действий отдельных ведомств в данном направлении остаются серьезной проблемой.

Качественных позитивных изменений в российской робототехнике можно ожидать лишь при ее системной поддержке, включающей:

- формирование стратегии развития отрасли, содержащей цели и механизмы ее реализации;
- создание условий для появления инновационных робототехнических проектов;
- систематизацию мер государственной поддержки отрасли и их настройку на достижение целей ее развития.

Инструментами выполнения этих задач могут стать:

- расширение программ исследований в связанных с робототехникой областях науки;
- формирование инженерного и предпринимательского потенциала отрасли, имеющего ключевое значение для ее развития;
- организация взаимодействия и кооперации представителей отрасли в рамках профессиональных ассоциаций и экспертных мероприятий;
- создание механизма координации действий различных ведомств и институтов развития для проведения активной отраслевой политики в сфере робототехники;
- поддержка разработчиков через государственный заказ;
- поддержка экспорта российской робототехники.

Реализация вышеуказанных мероприятий позволит существенно повысить долю отечественных разработок на глобальном рынке робототехнической продукции специального назначения и внедрить их в деятельность оборонно-промышленного комплекса страны.

V. Pryanichnikov [1-4], T. Bielic [4], O. Davydov [1], B. Katalinic [4,5], R. Khelemendik [1], A. Ksenzenko [3], S. Kuvshinov [2], Yu. Marzanov [2], E. Prysev [2], D. Vican [4], A. Uglesic [4]

INTELLIGENT ROBOTRONICS − THE WAY TO REALIZE SENSOR AND CONTROL SYSTEMS

[1] Keldysh Institute of Applied Mathematics Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
[2] International Institute of New Educational Technologies, Moscow, Russia
[3] Moscow State Technological University "STANKIN", Moscow, Russia
[4] University of Zadar, Zadar, Croatia
[5] Vienna University of Technology, Wien, Austria
v.e.pr@yandex.ru; branko.katalinic@tuwien.ac.at

This paper presents the results of the development of basic software and hardware elements of the network associated laboratories and robotariums as a project "Intelligent robotronics", initiated by the Central European branch of the International Academy of Engineering in conjunction with KIAM Russian Academy of Sciences, IINET RSUH, the universities of Russia, Croatia and Austria. The project gives the participants access to the full range of mechatronic devices and mobile robots, classrooms and facilities 3D-prototyping placed in partner organizations, their methodological / pedagogical development and lecture courses on the basis of joint research conducted with broad participation of graduate and undergraduate students, and even schoolchildren. This trend seems to be most promising for learning various popular specialty - computer science, robotics, marine and other technologies. The relevance of this project-oriented approach can be seen in long-term programs of the Russian Federation, and in the experience of cooperation CNRS (France) with the Russian Foundation for Fundamental Research to create a virtual scientific associations of real international research groups. Therefore, it was selected this area of cooperation in order to create intelligent mechatronic devices, integrating software ("middleware") and the means of knowledge representation and deduction algorithms.

"Intelligent robotronics" (IR) denotes the shortlist of methods related to the integrated use of robotics, sensorics, mechatronics, electronics (oriented to mechatronics), and methods of intelligent systems, applied to data processing in the feedback loops with delays (due to remote sensors or network specific effects) and to the planning/navigation systems in robotic devices. Thus, for education purposes, we collected the description of these methods into lectures and laboratory practice: two kinds of training activities for students and PhD students (totally up to 7 ECTS). The size of the course can be corrected in either side ± 4 credits. The course is based on the Russian-Austrian scientific school IR.

We consider our didactic approaches on the example of a recent experiments with groups of students from technical universities. Often these students had a minimum experience in programming and never used Python, but in 2-3 months (due to their interest to subject) they built interesting mathematical models for simulation of mobile robots in an unknown environment, using different combinations of remote sensors (ultrasonic and IR locators or TV-cameras), based on our decomposition of the task. The functions implemented by them simulate the SLAM algorithms and data flows between sensors and making decision modules.

Our main didactic tasks were: (1) Involve the students into the world of scientific and practical disciplines named "Intelligent robotronics" (using high motivation of students); (2) Give them an experience of "knowledge engineers"; (3) Write and verify simulation models of mobile robots (coding of final programs) on Python. The Python interpreter has a lot of advantages for our approaches. The objective of the course is to teach students to use the main concepts, approaches, and models of sensorics and mechatronics, as well as to study the regularities of modern methods of control; acquire skills in designing and finding applications, building models that arise in engineering, and perform computations with these models. The main goal of the course is to conduct a practical study of the foundations of information-sensor technologies for solving creative and typical control problems in future scientific or industrial fields.

The main didactic units (chapters) based on our own works and experiences are listed below.

Contact sensors (force-torque and tactile sensing; internal data sensors in robotics): feedback concepts, specific features of remote and contact sensors; sensor types: tensometry, principles of force-torque measurement; multicomponent sensors, tactile matrix and its implementation into real-time computer networks; pulse and code sensors for position and velocity measurements, Hall sensors, current measurements in control systems (CS), environment monitoring (pressure, humidity, temperature, etc.).

Remote sensors (sensor–locators and computer vision systems): acoustic location systems (models and methods of data processing; Fresnel–Kirchhoff models and its investigation; embedding filtered data flows from sensors into tracking/servo systems, into PID-regulators; triangulation and navigation methods); optical and laser range sensors (processing of discrete-range measurements conducted from mobile platforms for approximation of 3D objects); radar, electromagnetic, pneumatic, and infrared location sensors, pyrometers, side-view locators; conventional and non-conventional computer vision systems (classification of sources of matrix images – CCD, IR, light-sensitive memory, gamma locators; properties and synthesis of optical elements; conventional image processing algorithms – Huckel-like operators, chain code for contour description; stereo vision, photogrammetry); models of human vision and bionic approaches to designing image processing algorithms (human and insect – constancy, overexposure, gray field; inspection vision; segmentation and histogram analysis of color images);

Technology of intellectualizing the sensor-control systems (knowledge representation, automatic inference in predicate calculus, heuristic methods): methods of knowledge representation (graphs, Petri nets, flows in networks; production rules, frames, reduction to disjunctive normal forms), new and classical expert techniques for SLAM tasks and group control; Prolog-like descriptions, construction of inference mechanism and Herbrand's theorem; Herbrand-based and heuristic algorithms, A* optimal search in the space of states; new types of logic and deductive procedures.

Design of program-controlled autonomous systems (by examples of mobile robots and manipulators), intellectualization of sensor-control systems: control systems of mobile robots with AI elements (classification of ground and underwater robots; dimensions of the operating environment and mathematical simulation, design of simulators; expert schemes of coordination of information-motion activity); intellectualization of supervised sensor-control systems based on wireless internet-technologies, control methods with unpredictable delays; manipulator control (automatic assembly in engineering industry: avoiding 10–100x difference in accuracy, specification/construction of operation and testing graphs; direct and inversed kinematic problems in CS for welding, laser cutting, and painting; machine processing of parts by force manipulators).

The international laboratory "Sensorika" standardized the software development kit (SDK) for AMUR and other robots (both for simulation and modeling) in the form of a virtual box that can be set over all main operating systems and also integrates other software tools; for example, the Robotino software.

В.Е. Пряничников [1-4], Т. Биелич [4], О.И. Давыдов [1], Б. Каталинич [4,5], Р.В. Хелемендик [1], А.Я. Ксензенко [3], С.В. Кувшинов [2], Ю.С. Марзанов [2], Е.А. Прысев [2], Д. Вицан [4], А. Углешик [4]

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ РОБОТРОНИКА − СПОСОБ РЕАЛИЗАЦИИ СЕНСОРНЫХ И УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ*

[1] *ИПМ им. М.В. Келдыша РАН,* [2] *МИНОТ РГГУ,* [3] *МГТУ «СТАНКИН», Москва*
[4] *Задарский университет, Задар, Хорватия*
[5] *Венский технический университет, Вена, Австрия*
v.e.pr@yandex.ru; branko.katalinic@tuwien.ac.at

Аннотация

Предложена технология программно-аппаратной реализации верхнего (интеллектуального) и нижнего (роботронного) уровня сенсорно-управляющих систем распределенных мехатронных комплексов и ассоциированных лабораторий-роботариумов − новое научное направление «интеллектуальная роботроника».

Введение

В работе рассматривается создание научной базы и технологии программно-аппаратной реализации направления «интеллектуальная роботроника» (IR) , предусматривающего построение сети ассоциированных робототехнических лабораторий - унифицированной среды для быстрой сборки нижнего уровня систем управления группами мобильных роботов, распределенными комплексами из сотен взаимодействующих мехатронных устройств вне зависимости от применяемых в них элементов от различных производителей и поставщиков [1-4]. Это достигается за счет построения динамически реконфигурируемых иерархических графов программных сетевых взаимодействий и прав доступа, реализация которых может быть отнесена к созданию так называемого «middleware» [9] − специализированного программного обеспечения, дающего возможность быстрее сосредотачиваться на актуальных проблемах интеллектуализации, не отвлекая силы на преодоление низкоуровневых задач и осуществляя перепрограммирование устройств без их остановки (в отличии от [7,8]). Основное внимание уделяется также созданию эффективных способов представления знаний, технологии

* *Работа поддержана Задарским университетом в Хорватии, DAAAM International Vienna (Вена, Австрия), Международным институтом новых образовательных технологий РГГУ, МЛ «Сенсорика», ИПМ им.М.В.Келдыша РАН (Москва, Россия) и ЦЕО МИА (Вена, Австрия) в рамках Соглашения от 04.06.2014, а также частично грантами РФФИ № 13-07-00988а, № 13-07-01032а, программой фундаментальных исследований ОМН РАН «Алгебраические и комбинаторные методы математической кибернетики и информационные системы нового поколения».*

построения выводов и доказательств, использующих дедукцию как на основе логики ветвящегося времени (обладающей достаточной выразительностью и близостью к естественному языку при одновременном обеспечении закона исключенного третьего), так и в сочетании с альтернативной новой, предложенной нами «пента-логикой». Такая логика дает возможность генерации нестрогих противоречивых рассуждений, которые хорошо воспринимаются человеком, более ему понятны и позволяют реализовать поиск «ближайшего приемлемого решения» в реальном масштабе времени, и в том числе обеспечивать работоспособность при выходе из строя отдельных частей робототехнических комплексов. Основная идея так называемой «пента-логики», состоит в формализации механизма оценки не только реальных знаний и фактов, но и субъективных оценок (доверия, веры, ожидания) в качестве базы для построения экспертных управляющих схем с применением аппарата логики ветвящегося времени.

Все предлагаемые методы и программы отрабатываются в робариумах на автономных роботах “Амур” нового поколения совместным коллективом до 30 человек из организаций-партнеров (в рамках проекта РИА/МИА). К проведению научно-исследовательских работ в рамках разработанного учебно-методического комплекса также активно привлечены студенты и аспиранты из ИПМ им. Келдыша РАН, МГТУ «Станкин», МФТИ/СколТех, Международного института новых образовательных технологий РГГУ, других университетов России, Австрии, Хорватии, которые обучаются применению технологий «интеллектуальной роботроники» [10-12], начинавшихся с работ [5,6]. Помимо получения научных результатов, построена реальная сеть ассоциированных научно-учебных лабораторий-роботариумов, функционирующих как единое целое в перечисленных организациях и реализующих наиболее современную модель международных научных исследований с оценкой её результативности не по рейтингу в закрытой частной коммерческой зарубежной фирме, а по экспертной оценке из более чем 50 ведущих университетов ЕС, Азии и РФ, входящих в Ассоциацию по автоматизации и машиностроению DAAAM International Vienna.

Новые образовательные технологии

«Интеллектуальной роботроникой» обозначена совокупность методов, связанных с комплексным использованием робототехники, мехатроники, сенсорики, электроники, встраиваемой в мехатронные устройства, и методов интеллектуальных систем, применяющихся для обработки данных в контурах обратной связи с задержками, вызванными применением дистанционных сенсоров или специфическими сетевыми эффектами. Для целей построения образовательного процесса, мы собрали описание этих методов в лекции и лабораторные работы с варьируемым объемом от 4 до 10 ECTS. Курс основан на работах Российско-Австрийской научной школы IR [16]. Наши дидактические подходы рассмотрены на примере экспериментов с группами студентов из нескольких технических университетов. Студенты, имевшие минимальный опыт в программировании и никогда не использовавшие язык Python, уже через 2-3 месяца смогли строить математические модели мобильных роботов, планирующих перемещения в незнакомой обстановке и использующих различные комбинации дистанционных датчиков (ультразвуковых и инфракрасных локаторов, ТВ-камер). Реализованные функции моделировали работу алгоритмов типа SLAM [13-15] и обмен потоками данных между датчиками и модулями принятия решений.

Нашими основными учебными задачами были: (1) вовлечь студентов в мире научных и практических дисциплин, обозначенных нами как «Интеллектуальная роботроника» (высокая мотивированность обучения за счет интереса к предметной области); (2) Дать им опыт работы в качестве «инженеров по знаниям» (Рис. 1); (3) Написать и проверить работу имитационных моделей мобильных роботов на языке Python, имеющем для нас больш*и*е преимущества.

Цель разработанного курса состояла в том, чтобы научить студентов использовать основные понятия, подходы и модели сенсорики и мехатроники, а также изучить современные методы управления; приобрести навыки и компетенции в проектировании и применении, построенных моделей в робототехнике и машиностроении, практически изучить основы технологии построения интеллектуальных информационно-измерительных и управляющих систем.

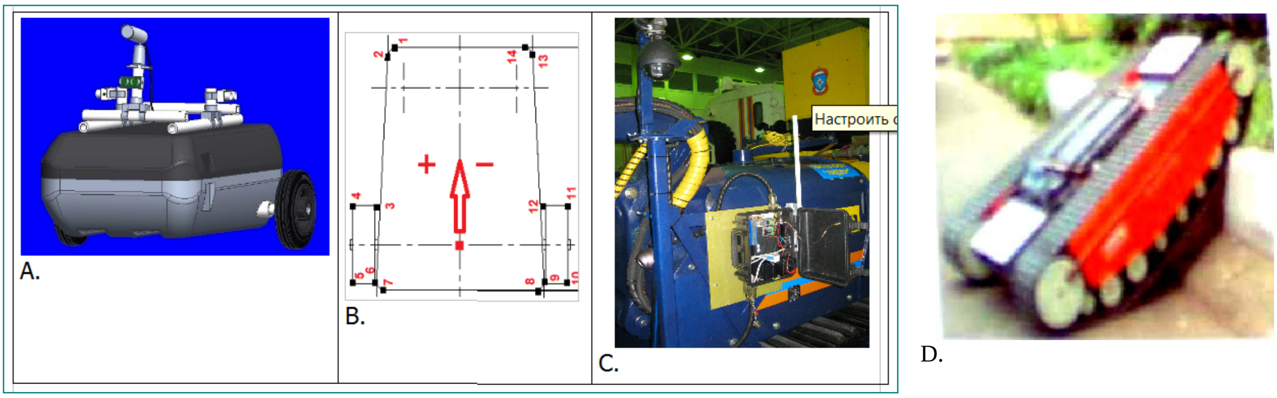


Рис.1. Разработки программно-аппаратных комплексов D,C,A и проецирование соответствующих НИР на учебные работы «инженеров по знаниям», например, при реализации математической модели выявилась необходимость её минимизации путем замены полных 3D-чертежей учебного робота (A) его упрощенным представлением по ключевым точкам (такое представление становится универсальным для роботов D,C,A)

Ниже приведено перечисление основных дидактических единиц (разделов) базирующихся на нашем собственном опыте. Это позволяет оценить направления, проведенных ранее исследований.

Контактные датчики (силомоментные, тактильные и другие датчики внутренней информации, встраиваемые в микропроцессорные системы): концепции построения обратных связей, особенности дистанционных и контактных датчиков; тензометрические, тактильные матрицы, многокомпонентные датчики и реализация их работы в режиме реального времени в компьютерных сетях; импульсные и кодовые датчики положения и скорости, датчики Холла и тока в системах управления, мониторинг окружающей среды (измерение давления, влажности, температуры, химического загрязнения и т.д.).

Дистанционные датчики (локационные сенсоры и системы компьютерного зрения): акустические системы определения местоположения (модели и методы обработки данных, Френеле-Кирхгофовские модели и их исследование; встраивание отфильтрованных потоков сенсорных данных в следящие системы и PID-регуляторы; триангуляция и методы навигации); оптические датчики и лазерные дальномеры (обработка измерений и особенности дискретизации дальностей); радары, электромагнитные, пневматические и инфракрасные датчики определения местоположения, пирометры, локаторы бокового обзора; простейшие алгоритмы обработки изображений - операторы Хюккеля, цепное кодирование для описания контура, сегментация и гистограммный анализ цветных изображений, стерео зрение и фотограмметрия; нетрадиционные и инспекционнные системы компьютерного зрения (классификация источников матричных изображений - CCD, ИК, светочувствительная память, гамма-локаторы, свойства и синтез оптических элементов); модели человеческого зрения и бионические подходы к разработке алгоритмов обработки изображений (зрение человека и насекомых - константность, засветки и образование серого поля, сканирование пространства, роль тремора).

Технологии интеллектуализации сенсорных систем (представление знаний, автоматический вывод в исчислении предикатов, эвристические методы): методы представления знаний (графы, сети Петри, потоки в сетях; правила вывода, фреймы, приведение к дизъюнктивной нормальной форме); новые и классические методы экспертных систем для решения задач SLAM и группового управления; язык Пролог, строительство механизмов вывода и теорема Эрбрана, Эрбрановская база и эвристические алгоритмы, A* - поиск оптимального пути в пространстве состояний; новые типы логики и дедуктивных процедур.

Разработка программного управления адаптивных систем (на примерах мобильных роботов и манипуляторов), интеллектуализация сенсорно-управляющих систем: системы управления мобильными роботами с элементами искусственного интеллекта (классификация наземных и подводных роботов, размерность операционной среды и математическое моделирование, разработки тренажеров; экспертные схемы координации информационно-двигательной активности); интеллектуализация управления на основе беспроводных интернет-технологий, методов управления в условиях непредсказуемых задержек; управление манипуляторов (автоматическая сборка в машиностроении: алгоритмическое преодоление разницы в точности 10-100х, формирование и реализация сборочных и тестовых графов); прямая и обратная кинематические задачи в СУ для сварки, лазерной резки, машинной обработки деталей силовыми манипуляторами.

Специализированное программное обеспечение

Реализация новых образовательных технологий потребовала создания не только учебных курсов и сети лабораторий-роботариумов, но и разработки стандартизированного пакета программного обеспечения (SDK) для мобильных роботов, использующегося как для их моделирования, так для разработки и тестирования систем реального времени в виде virtual box, который может быть установлен на все основные операционные системы, а также позволяет интегрировать и другие программные средства. Как отмечалось, к проведению соответствующих НИР активно привлекаются и студенты. Поэтому для работы с приложениями, создаваемыми для различных робототехнических устройств (Амур, Festo-Robotino) и для микроконтроллеров, был предложен набор специализированного программного обеспечения (ПО), который позволяет нивелировать известные проблемы эксплуатации и разработки разнообразных приложений в условиях распределенной “нестабильной” команды разработчиков - то есть команды, к работе в которой как раз широко привлекаются студенты и аспиранты:

- поддержание версионной и конфигурационной целостности ПО;
- быстрое обновление программных продуктов до последних стабильных версий;
- совместимость приложений, написанных разными разработчиками, включая обучающихся студентов;
- доступность и сохранность результата работы каждого разработчика.

При формировании такой унифицированной среды проектирования, разработки и тестирования AMUR-DEV мы отталкивались от идеи создать удобный, кросс платформенный и мобильный инструмент, с которым можно начать работу сразу после запуска, без необходимости в дополнительной, зачастую сложной, конфигурации приложений и их интеграции друг с другом. Именно поэтому был выбран формат дистрибуции в виде предварительно настроенной виртуальной машины, которая совместима с наиболее популярными, бесплатными, настольными решениями виртуализации, такими как Oracle VirtualBox и VMware Player. Таким образом, сформированная унифицированная среда AMUR-DEV представляет собой виртуальную машину на базе операционной системы Ubuntu с предустановленными программными пакетами для разработки приложений и управления робототехническими устройствами Амур, Festo-Robotino и другими, а также среду программирования микроконтроллеров Arduino. В связи с тем, что в мобильных роботах Амур преимущественно используется язык программирования Python, в операционную систему установлены дополнительные пакеты, графические и вычислительные библиотеки для данного языка. В качестве графической IDE используется платформа разработки Eclipse с модулем расширения PyDev. Программные продукты выбирались с учетом лицензионной “чистоты” и возможностью и бесплатного использования. При конфигурации AMUR-DEV особое внимание уделялось совместной работе в рамках виртуальной лаборатории, что подразумевает интеграцию с централизованным сервером проекта АМУР, на котором размещены репозиторий, средства автоматического тестирования и сервисы коллективной работы. Таким образом, данная среда обеспечивает быструю интеграцию нового участника в проект, контроль версий, эффективное обучение самым современным IT-технологиям и возможность ведения достаточно масштабных программных разработок и НИР.

Комплексное применение автономных мобильных роботов АМУР

Мобильные роботы серии АМУР (колесные, гусеничные и шагающий движители) начали разрабатываться и изготавливаться в Международной Лаборатории «Сенсорика» с 2009 года. Существенно более ранняя наша разработка гусеничного робота показана на Рис.1D. Усовершенствованные СУ (серии 10 и 20) позволяют осуществлять управление по сети как отдельными устройствами, так и несколькими роботами группы АМУР через специальные видео-посты управления, в т.ч. удаленно и с одновременным доступом к их перепрограммированию без необходимого в традиционных системах перезапуска программного обеспечения. Применяемая в данной разработке технология была отлажена для управления видео потоками в устройствах МЧС при условиях эксплуатации -30С,...,+40С (Рис. 1С). Мы поставляем исследовательские производственно-учебные комплексы мобильных технологических роботов (Рис. 2), ориентированные на решение таких исследовательских задач как: отработка алгоритмов уклонения от препятствий по данным ультразвуковых локаторов; создание методов поиска ориентиров/маркеров для навигации мобильных технологических роботов; разработка способов группового управления технологическим оборудованием и мобильными роботами, включая сетевое управление через подвижные ретрансляторы и мобильные системы технического зрения.

Эти же задачи эффективны для использования в учебных целях в качестве основы лабораторных работ и студенческих НИР. Комбинированное супервизорное управление технологических роботов включает элементы автоматизированных методов построения трассы движения на основе экспертных схем принятия решений для обеспечения следования вдоль стен, преодоления дверей, отслеживания тупиков и других задач [14,15].

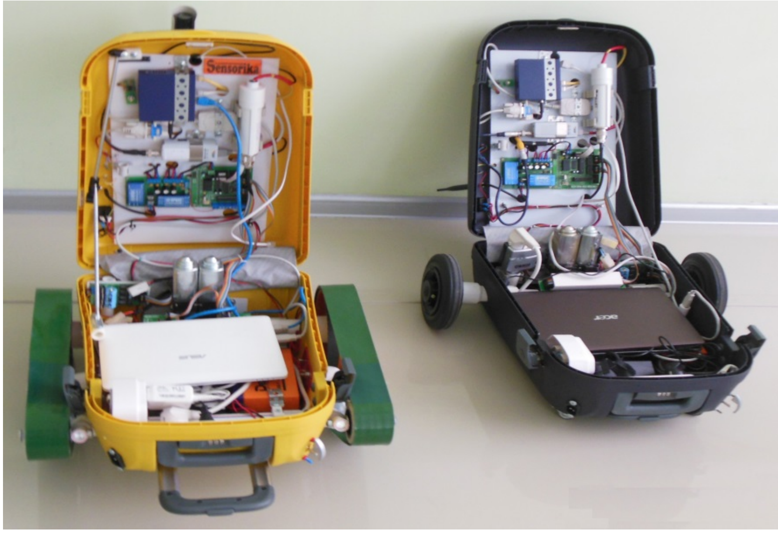


Рис.2. Внешний вид и основные параметры роботов АМУР

1. Вес интеллектуального герметизированного колесного или гусеничного шасси – до 21 кг, в т.ч. СУ - до 3 кг, и дополнительная возможная сенсорная нагрузка, устанавливаемая Заказчиком , весом до - 7-10 кг.
2. Шасси снабжены двумя задними ведущими колесами, на осях которых установлены одометры, и двумя гусеницами или передними рояльными колесами.
3. Скорость плавно регулируется от 15 до 750 мм/с, Запас хода - от 0.9 до 2.5 км, автономность – до 2 часов.
4. Скорость управляющего радиоканала - 2 Мб/с на 50 м (в условиях прямой радиовидимости) или меньшая скорость для больших расстояний 1 Мб/с, 400 м.
5. Используются легкодоступные двигатели постоянного тока 12в, до 40 Вт., 2 закрытых аккумулятора > 4.5 А-ч.
6. Исполнение робота: -10С,..., +40С, с частичной защитой от атмосферных осадков, в сплошном запираемом корпусе, габариты: макс. 580х560х380 мм (ДхШхВ).
7. Оборудован захватным устройством для тяжелых объектов (дополнительная опция).
8. Унифицированные места операторов выполнены на базе моноблоков с необходимой периферией, а также технологические пульты управления роботами, сделанные на базе стандартных ноутбуков.
9. В систему управления встроены микро-РС в антишоковом исполнении с малогабаритным LCD-экраном, в т.ч. нетбук или таблет-PC, до 1.4 ГГц с операционной системой Ubuntu, сконфигурированной под наши задачи,
1 электронная плата для управления 4 каналами по 4-5А в режиме on-off, 8 каналами ввода дискретных данных,
2-13 каналами ультразвуковых сенсоров и открытым интерфейсом I2C/USB для расширения состава сенсоров и
2-мя каналами силового ШИМ-управления по 6-10А.
10. На роботе установлены ультразвуковые датчики (2-13 шт.) измерения дальности 15-400 см и аналоговая ТВ-камера с управлением от электронной платы. Камера улучшенного разрешения подключается по стандарту Ethernet, устанавливается на 2-х степенном подвесе с углом поворота не менее 210 град.
11. Программное обеспечение, преимущественно на языке Питон, обеспечивает гибкий доступ к оборудованию в распределенной среде с Wi-Fi соединениями до 50 метров для решения локомоционных задач супервизорного управления со сбором ТВ и ультразвуковых данных на группе роботов до 10-50 шт.

Одной из особенностей разработанного ПО является работа в режиме реального времени на распределенной сети, при этом все данные фиксируются в специальных шлейфах (DTF), отражающих все детали работы в течение недели/месяца функционирования мобильных роботов. Шлейфы DTF обеспечивают не просто запись данных в файлы; они обеспечивают синхронизацию данных, экстраполяцию и интерполяцию, избегая проблем задержек передачи данных и управляющих сигналов, образования пробелов в потоке данных за счет соответствующей быстрой логической фильтрации (удалось использовать менее 10 арифметических операций на каждую запись), что обеспечивает удаление и восполнение до 60% некорректных данных от дистанционных сенсоров, компенсирует задержки поступления данных и сигналов управления.

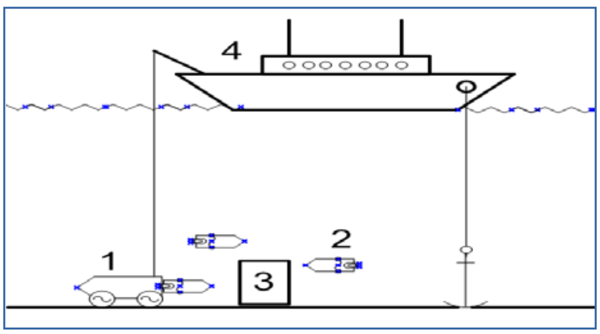


Рис.3. Схема сервисного робототехнического комплекса: 1-базовая станция, 2-мобильные модули (3 шт.) 3-объект работ, 4-сопровождающее судно

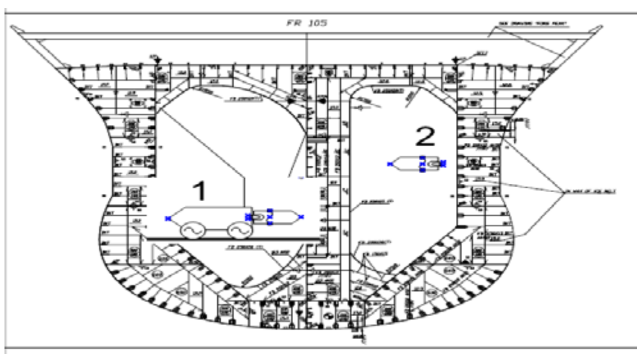


Рис.4. Проект роботизированного распределенного сервисного комплекса для обследования судов: 1-базовая станция, 2-мобильные инспекционные модули

Такой подход особенно оправдан для реализации управления мобильным инспекционным комплексом, состоящим из нескольких унифицированных модулей, работающих как единое целое с механическим соединением или бесконтактно на расстояниях нескольких десятков метров (Рис. 3,4).

1. A.A. Kirillchenko, V.E. Pryanichnikov, and K.V. Rogozin, Limits of validity and reliability of proofs. Scepticism in mathematics, functions, and traditions. Information-Measuring and Control Systems, 2013, nos.4, v.11, pp. 57–65. Кирильченко А.А., Пряничников В.Е., Рогозин К.В. Пределы достоверности и надежности доказательств. Скептицизм в математике, функции, традиции // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2013. №4, т.11, С. 57-65.
2. A.A. Frolov, E.V. Biryukova, P.D. Bobrov, O.A. Mokienko, A.K. Platonov, V.E. Pryanichnikov, and L.A. Chernikova, Principles of neurorehabilitation based on the brain–computer interface and biologically adequate control of the exoskeleton, Human Physiology, 2013, vol.39, no.2, pp. 196–208.
3. R.V. Khelemendik, An algorithm for determining satisfiability formulae of computation tree logic and an effective algorithm for constructing derivations of valid formulas from axioms. Mathematical Issues of Cybernetics, no. 15,A collection of papers, ed. by O.B. Lupanov. Moscow: Fizmatlit, 2006, pp. 217–266. Хелемендик Р.В. Алгоритм распознавания выполнимости формул логики ветвящегося времени и эффективный алгоритм построения выводов общезначимых формул из аксиом. // Математические вопросы кибернетики. Вып. 15: Сборник статей / Под ред. О.Б. Лупанова. - М.: Физматлит, 2006, С. 217-266.
4. B. Katalinic, V. Pryanichnikov, K. Ueda, P. Cesarec, R. Kettler, et al., Bionic Assembly System: hybrid control structure, working scenario and scheduling. Proceedings of 9th National Congress on Theoretical and Applied Mechanics, Brussels, 2012, pp.101–108.
5. V.V. Klyuev, Yu.A. Kondrat’ev, D.E. Okhotsimsky, E.P. Popov, V.E. Pryanichnikov, et al.,‘Sensor Systems and Adaptive Industrial Robots’, in monograph: Mashinostroenie, 1985, Chapters 3–5, pp. 56–172.
6. D.E. Okhotsimsky, V.A. Veselov, A.K. Platonov V.E. Pryanichnikov, ‘Educational Modular transport robot with PC control’, in Proceedings of the IV Int. conf. on Flexible production systems, Moscow: Int. R&D Institute on the Control Problems, 1987,pp.62–64.
7. ROS: http://www.ros.org. Accessed: 22.09.2014.
8. Microsoft Robotics Developer Studio.-URL:http://www.microsoft.com/en-us/download/details.aspx?id=29081. Accessed: 22.09.2014.
9. W. Emmerich, M. Aoyama, J. Sventek, The impact of research on the development of middleware technology, ACM Transactions on Software Engineering and Methodology. New York: ACM, 2008, Vol. 17, no. 4. pp. 19–48.
10. V. Andreev, S. Kuvshinov, V. Pryanichnikov, Yu. Poduraev, Education on the basis of virtual learning robotics laboratory and group-controlled robots. 24th DAAAM International Symposiumon Intelligent Manufacturing and Automation, 2013, Procedia Engineering, 2014, Vol. 69, pp. 35–40.
11. Scientific-educational distributed laboratory - software and hardware means // V. Pryanichnikov, V. Andreev, P. Bobrov, E. Biryukova, A. Frolov, K. Kharin, K. Kirsanov, A. Kostin, S. Kuvshinov, Y. Marzanov, and E. Prysev, Annals of DAAAM for 2012 & Proceedings of the 23rd International DAAAM Symposium, Vol. 23, no. 1, ISSN 2304-1382, ISBN978-3-901509-91-9, DAAAM International, Vienna, Austria, EU, 2012.
12. V.E. Pryanichnikov. New creative educational technologies for inter-university network / V.E. Pryanichnikov, B. Katalinic, A.A. Kirilchenko, R.V. Khelemendik, S.V. Kuvshinov, D. Vican, A. Uglesic // 25th DAAAM International Symposium «Intelligent Manufacturing and Automation», 2015. Procedia Engineering, Elsevier, ISSN 1877-7058
13. Liu Kai, Sun Zengqi, An Bin. Localization system for mobile robot using scanning laser and ultrasonic measurement. //Journal of Central South University (Science and Technology), Beijing, China.Vol.42 Suppl. 1, 2011, pp.421-447.
14. О.И. Давыдов, А.К. Платонов. Сеть Пассфреймов - комбинированная Модель операционной среды мобильного робота. //Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша РАН №15, Москва, 2015, 28стр.
15. О.И. Давыдов, В.Е. Пряничников. Управление движением мобильного робота по данным ультразвуковых сенсоров - Информационно- измерительные и управляющие системы (Интеллектуальные адаптивные роботы, т.10, № 1-2, 2015), М.: Радиотехника, 2015. -Т.13, № 4 - С.51-58. ISSN 2070–0814.
16. Синергетический эффект создания научных школ - основные направления «Интеллектуальной роботроники»./Под ред. В.Е. Пряничникова // Интеллектуальные и адаптивные роботы. 2013, № 1-2, Т.8, С.3-6, а также Информационно-измерительные и управляющие системы. 2013. №4, Т.11, С. 3-6.

K. Senchik, V. Kharlamov, N. Gryaznov, A. Lopota
ABOUT PROSPECTS OF APPLICATION OF A ROBOTICS IN MEDICINE

RTC, Saint-Petersburg
gna@rtc.ru

К.Ю. Сенчик, В.В. Харламов, Н.А. Грязнов, А.В. Лопота
О ПЕРСПЕКТИВАХ ПРИМЕНЕНИЯ РОБОТОТЕХНИКИ В МЕДИЦИНЕ

ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург
gna@rtc.ru

Аннотация

Тема статьи относится к общей глобальной проблеме «человек-техника», однако в случае применения робототехники в живых системах, а именно в медицине на первый план выходит дуализм (двойственность) в вопросах анализа и синтеза знаний.

Действительно, в данном аспекте с одной стороны человек является объектом воздействия робототехнических систем, а с другой-субъектом, управляющим этими медицинскими системами. При создании и применении робототехнических систем медицинского назначения необходимо учитывать эту ситуацию с позиций достижений физиологии, психологии и современных достижений микроэлектроники, мехатроники и в будущем – нанотехнологии.

Быстро развивается внедрение роботов в сферу здравоохранения. Стремительно стареющее население в развитых странах мира, изменение структуры заболеваемости в сторону трудноизлечимых онкологических и сосудистых заболеваний приводит к увеличению производственной нагрузки на систему здравоохранения. Уже имеются факты несостоятельности традиционных подходов к организации системы здравоохранения, приводящие только к увеличению финансовых затрат общества, которые не являются безразмерными. В этом плане надо полагать, дальнейший прогресс может быть связан с внедрением медицинских роботов в лечебный, диагностический и профилактический процесс, которое должно повысить эффективность системы здравоохранения за счет увеличения производительности труда.

Эффективность применения робототехники в медицине обусловлена необходимостью обеспечения значительно возросших требований к точности выполнения хирургических манипуляций (микрохирургия), увеличению длительности функционирования в условиях усложнения техники операции и тенденции к комбинированным и сочетанным вмешательствам, необходимости обеспечения удаленного доступа (телемедицина) [2]. Наиболее востребованными такие системы оказываются в условиях чрезвычайных ситуаций или при воздействии на организм человека экстремальных факторов, особенно при массовом характере поражений, когда возникает дефицит сил и средств медицинской службы.

Современная хирургия на пути своего развития столкнулась с объективными ограничениями дальнейшего совершенствования, связанными, прежде всего, не с невозможностью усовершенствования материалов и аппаратов, а именно с достижением предела физиологических возможностей человеческого организма, врача - хирурга и его ассистента как субъекта технологического процесса.

Подготовка современного хирурга требует длительного времени, тщательного профессионального отбора и обходится обществу крайне дорого. К сожалению, продолжительность активной работы хирурга, как правило, ограничивается двумя-тремя десятилетиями именно из-за повышенных физических и психо-эмоциональных нагрузок, связанных с условиями его труда. Все вышесказанное относится и к другим членам хирургической бригады – ассистентам и операционным сестрам, а также анестезиологам, перфузиологам, лаборантам и другому техническому и медицинскому персоналу [2].

Необходимо отметить, что если замена мануальных функций хирурга средствами робототехники, по-видимому, является делом далекого будущего (хотя протезирование отдельных наиболее простых и часто повторяемых движений возможна, например - подхватывание хирургической нити при наложении шва), то современные роботы вполне достигли такого уровня совершенства, что могут частично или полностью заменить ассистента или операционную сестру, причем проявив при этом значительно большую точность исполнения манипуляций, выполнять их в автоматическом, многократно повторяемом режиме и, что является чрезвычайно важным, практически неограниченное время [5].

К перспективам управления робототехническими системами оператором относится развитие интерактивного – диалогового управления. Необходимость при этом описание параметров внешней среды должно сопровождаться созданим 3D стилизованных изображений этой среды с использованием методов виртуальной реальности, дополненных введением геометрических размеров и нанесением планируемых траекторий движения.

Возможна на современном этапе замена рутинных процедур, выполняемых квалифицированным медицинским персоналом, таких как обработка больших раневых поверхностей специальным инструментом, работоассистированными операциями, выполняемыми в автоматизированном режиме (лазерное облучение и др. виды обработки язвенной поверхности в дерматологии, раневой поверхности в гнойной хирургии, ожоговой поверхности в камбустиологии и т.п.).

Важной задачей, решение которой возможно только с применением роботизированных медицинских комплексов, является дистанционное оказание квалифицированной медицинской помощи раненым, больным и пострадавшим в условиях опасных для нахождения персонала (радиационное заражение местности и т.п.), или невозможность доступа к ним (нахождение под завалами, на борту аварийного судна, космической станции и т.п.) [3].

Серьезные успехи достигнуты при создании и аппаратов поддержания жизнедеятельности.

Однако, их функционирование в автономном или дистанционном режимах ставит задачи адаптивного и интеллектуального управления.

Это требует разработки новых кибернетических алгоритмов функционирования технических систем на основе выявленных биологических алгоритмов. Это может способствовать созданию аппаратов качественно более совершенных.

Изложенное иллюстрируется приведенными ниже кратким описанием проектов по разработки роботизированных и мехатронных систем для медицины, проводимых в ЦНИИ РТК.

1) Мехатронные перфузионные насосы для экстракорпорального кровообращения. В период с 2004-2006 гг. была проведена работа по разработке перфузионного насоса нового поколения «МАРС» для кардиохирургии, была выпущена опытная партия насосов. Насосы «МАРС» (см. рис. 1) до сегодняшнего дня успешно работают в медицинских учреждениях. В настоящее время проводятся НИОКР по разработке компактных насосов крови на базе роликовых и центробежных насосов.

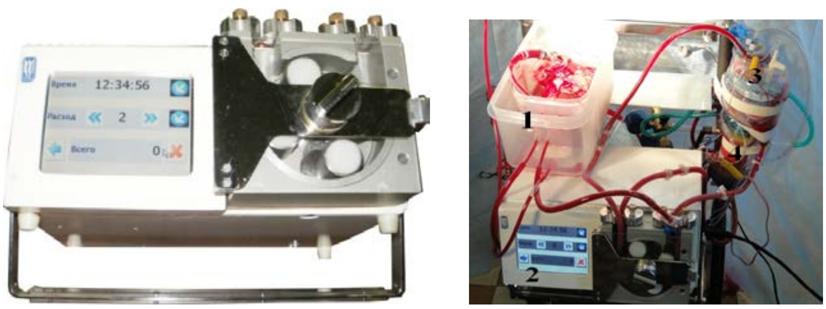


Рис. 1. Перфузионый насос «МАРС»

2) Автоматизированный лечебно-диагностический комплекс поддержания жизнедеятельности человека «АНГЕЛ», разработанный совместно с МГУ им. М.В. Ломоносова. Комплекс «АНГЕЛ» (см. рис. 2) предназначен для автоматической диагностики неотложных состояний пациентов по объективным функциональным показаниям и введения лекарственных препаратов по определенному алгоритму. В настоящий момент идет организация серийного производства комплекса «АНГЕЛ» на предприятии ОАО «НПО «СПЛАВ» г. Тула.

Рис. 2. Автоматизированный лечебно-диагностический комплекс «АНГЕЛ»
в мобильном исполнении

3) Робототехнический комплекс компрессии грудной клетки и конечностей для повышения эффективности мероприятий сердечно-легочной реанимации (СЛР) при внезапной остановке сердца. В ходе проведения работы рассматривается возможность применения мехатронного принципа передачи механической энергии от исполнительного устройства к грудной клетке пациента при одновременной работе системы пневматических автоматических жгутов, наложенных на конечности пациента, для повышения эффективности СЛР. Особое внимание уделяется системе контроля эффективности СЛР. В настоящий момент идет этап эскизного проектирования. Эскиз комплекса представлен на рис. 3.

Рис. 3. Робототехнический комплекс компрессии грудной клетки и конечностей

4) Роботизированный комплекс по введению радионуклидных микроисточников в опухоль при операциях брахитерапии. Актуальность создания комплекса обусловлена необходимостью обеспечения значительно возросших требований к точности выполнения хирургических манипуляций и защиты медицинского персонала от радиационного облучения при работе с радионуклидными источниками.

В настоящее время идет этап теоретических исследований. Разрабатывается математическая модель движения гибких игл по криволинейной траектории (см. рис. 4).

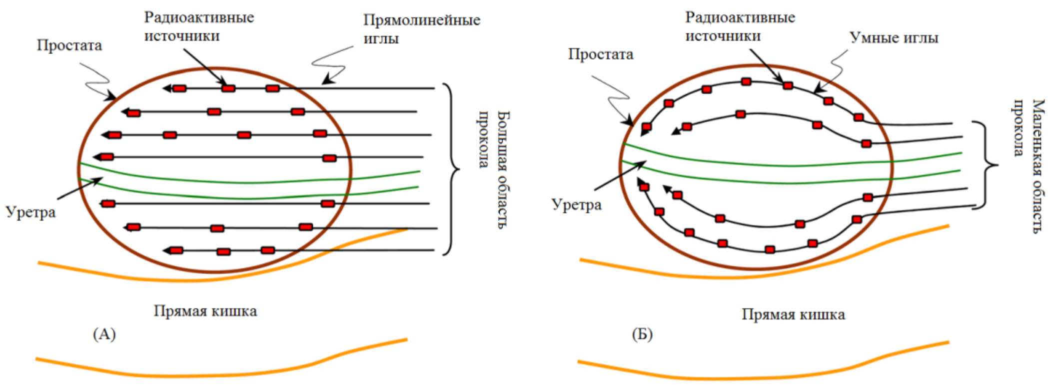


Рис. 4. План проведения манипуляций с использованием гибких игл

1. Анохин П.К. Принципиальные вопросы общей теории функциональных систем. — М., 1971.
2. Багненко С.Ф. Основные положения концепции развития скорой медицинской помощи в Российской Федерации // Скорая медицинская помощь. – 2009. – Т. 10, № 2. – С.50–54.
3. Сенчик К.Ю., Харламов В.В. Перспективы создания миниатюрных мехатронных аппаратов поддержания кровообращения в организме человека в экстремальных ситуациях // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2013. – Т. 164, №1. – С. 32–37.
4. Сеченов И.М. Рефлексы головного мозга. М.: Издательство академии медицинских наук СССР, 1952, 211 с.
5. Юревич Е.И., Игнатова Е.И. О бионическом подходе к робототехнике // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2006. – №2. – С. 7–10.
6. Юревич, Е. И. Основа инновационного развития - научно-техническое творчество // Инновации: наука, производство. – 2011. – №8 – С.11–17.

7. Lopota V.A., Kondratiev A.S., Kirichenko V.V., Mitrenin V.B., Senchik K.Y.. Opportunities of application of mechatronic perfusion pumps “MARS” in the system of complex measures concerning the liquidation of medical and biological consequences of hypothetical terrorist acts using radionulide contamination // Material of conference:Technical means for prevention of radiation terrorism and liquidation of its consequences“ S-Pb. 2004. P. 204-208.
8. Wiener N. Cybernetics // Sci Am. – 1948. – Vol. 179, №5. – P. 14–18.

I.B. Ushakov[1], A.V. Polyakov[1], A.A. Karpov[2], V.M. Usov[1]

MEDICAL ROBOTICS AS A NEW STAGE OF DESIGNING ON-BOARD TRAINERS AND BIOTECHNICAL SYSTEMS FOR THE SPACE STATION

[1] *State Research Center RF – Institute of Biomedical Problems Russian Academy of Sciences, Moscow iushakov@imbp.ru; apolyakov@imbp.ru; vitali1946usov@yandex.ru*
[2] *St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences (SPIIRAS), St. Petersburg, karpov@iias.spb.su*

Introduction

One of the activities of medical support during space flights is on-board trainings aimed at reducing the influence of negative impacts of the space flight on the human body and preparing cosmonauts to return to "usual" earth living conditions. Besides these activities, which are constantly carried out, sometimes trainings are held inside the Russian segment (RS) of the International Space Station (ISS) aimed for improving readiness of crew members: (1) to survive and rescue in extreme conditions with equipment failures and emergency situations; (2) to provide medical care in the case of emergency medical situations (diseases and injuries) and with increasing risks of reduction of the efficiency of the crew members. Given the importance of health problems, which are solved by the crew during flights, it is very actual to consider the question of expanding an arsenal of tools available on the board, cures of the medical care and the medical care in general. At the same time, in the category of useful devices it should be included not only the traditional medical treatment kit, diagnostic apparatus and instruments, but also solutions, built on technologies of robotics and computer science. It is very important to use them in situations, where getting crew advisory support from healthcare professionals is difficult because of autonomous flight conditions and crew members should carry out medical activities on the board of the ISS by themselves relying on their own resources and skills only.

New directions of using medical robots at manned space flights

New areas of application of medical robots in the ISS could include:

1. Building on-board trainers: simulators based on the technology of virtual reality, computer science and robotics, which allow providing production of new practical skills and maintaining old skills and techniques for emergency medical care during space flights for the crew members.
2. The use of manipulation robots in some emergency cases during a free flight for robot-assisted surgery at certain diseases and injuries of the crew members.
3. Creating (and development of existing medical technologies and prevention of violations of cosmonauts’ health) robotic biotechnical complexes that allow, according to the bio-feedback principles, providing favorable conditions for: (a) adaptation of human’s organism to different flight factors; (b) proactive correction and prevention of violations of the pre-clinical level; (c) recovery of cosmonauts' efficiency after illnesses, injuries, stress-induced disorders, etc.

Each of these areas has its own characteristics, and today it is important to make a systematization of variants of the usage of medical robots at the manned space flights in addition to a robot-assistant of the crew planned to perform professional tasks and to work with the payload on the manned space complex (MSC).

Conducting medical trainings during the flight with the use of on-board trainers built with robotic simulators.

In [1], the importance of using new medical and information technologies, which can reduce the risk of the crew unintentional errors associated with the loss of in-flight skills performing medical procedures, is reported. Recently, the usefulness of using simulation technologies for preparing professionals in various areas of activities was indicated [2]. In particular, a set of medical procedures and techniques, which were possible to work out and to assess with the use of modern robotic simulators, today turned out to be quite extensive; moreover, it covers the areas of surgery, anesthesiology, resuscitation, and first aid.

Prerequisites of the use of these technologies for medical training on the board of MSC are as follows.

• The use of modern simulation technologies will allow organizing the trainings during long-term space flights aimed at the formation and maintenance of the crew's skills for performance of medical procedures, including

invasive means and tools, which are available inside the RS of the ISS as a part of the first aid kit and medical packages.
Development of an educational technology opens new opportunities for cosmonauts to gain manual skills relevant to applications during autonomous flights if it is necessary to give the first medical assistance to the crew members (as a self-assistance).
One of the most perspective options for education and training in the RS of the ISS may be the usage of airborne simulators built on the basis of virtual reality technologies and/or constructed in the form of robot-simulators. The method of medical training simulators on the robot simulators is justified in situations, when the executive component involves development of "muscular sense", proper execution of the exercises, taking into account anatomical relationships and proximity to the area of manipulation of vital organs, large vessels, nerve trunks, etc. In these cases it is also important to know and have an idea of the resistance of various tissues to mechanical stresses with the use of medical instruments.
In addition, in many situations, performing activities related to the risk to the patient and potential medical errors, the performer focuses on getting "back" links from the patient, including the involuntary reaction of his/her body and voice transmission of his sensations that can be received with the help of robot-simulators.
In order to develop and maintain cosmonauts' skills of performing medical methods and procedures it makes sense to: a) severely restrict scenarios with most typical and most probable cases (non-standard medical situations); b) focus the attention of learners on accuracy and speed of enforcement actions, when the appropriate methods for relief of the emergency medical situations take place; c) base on the availability and proper selection of medical equipment for the ISS. Also, for these purposes on-board information support tools with the usage of the augmented reality technology can be used.
Among the vast literature devoted to creation of medical robots, there are descriptions of medical simulators that are used to build and maintain practical skills and to perform typical procedures and manipulations.
For example, in [3], the problem of learning the technical devices of venisection, catheterization and venipuncture with the usage of a medical simulator is solved. Besides, there are some publications, where it is used the learning of techniques for airway and medical care of wounds: local anesthesia, surgical treatment of wounds and sutures [4,5] as a mandatory component of training scenarios. The medical simulator for the assessment of putting in stitches, described in [4], allows measuring efforts that were applied. Appropriate removal devices (e.g. strain gauges) and signaling ones are implanted into the robot-simulator. In another product [5], an anthropomorphic simulator designed to teach airway and intubation training, the implanted strain gauges to measure the applied force. When the educable on the simulator performs intubation, the doctors measured the application of force in the area of teeth, temporo-mandibular joint, tongue, etc. In addition, as a feedback the pulmonary ventilation performance is calculated from the measured values. From the structural and methodological points of view it is essential that this simulator can change geometric relationships of its drives, which are located in anatomic areas of the temporo-mandibular joint and neck. This allows controlling the resistance during intubation at different anatomical proportions of the patient airway. By implementing this feature, the simulator can imitate a "patient" with a closed jaw, with small and large jaws, with muscle spasms, with those features that determine the difficulty of intubation performance. Using these opportunities with planning the training on a trainer- simulator to perform the procedures with individual patients it is possible to specify anthropometric indices in advance and configure the simulator accordingly.
As a perspective program of development of airborne simulators based on 3D-visualization technologies and robotic simulators it is proposed to consider the following list of medical techniques and methods, which should be based on competence of a cosmonaut conducting urgent measures such as resuscitation, intravenous medications, defibrillation, bladder catheterization, limb immobilization trauma, methods for extraction of foreign bodies (in an eye, ear, nose and throat), treatment of wound surfaces, etc.
Elaborating on this list in the future, one can significantly narrow down the search of terrestrial prototypes, which could form the basis for on-board (flight) medical simulator based on a robot-simulator.
Having completed the characteristics of possible directions of medical robots use for building on-board simulators, we should mention such a possibility as the usage of robotic simulators together with remote controlled robotic manipulators to perform surgery on the board of the MSC in the remote control mode from the Earth. The possibility of the usage of the American anthropomorphic robot Robonaut-2 at the ISS is mentioned in interviews of testers of its analogs in clinical settings [6,7].
In the general formulation the possibility of application of the robot-assisted surgery on the board of the MSC will be discussed in the following part.

Use of medical robots for robot-assisted surgery during the manned flight

Today, the most of publications devoted to medical robots refer to robot-assisted surgery issues. The question is: what extension is needed to transfer these technologies to the board of the MSC? If we turn to the terrestrial analogues prototypes, we can note the following. It is an ability to perform manipulation specialized tools, built and operates on the principle of human's arm and hand, is based in the foundation of the usage of the surgical robotic manipulators. With their appearance, a new stage in the development of medical science started and many unshakable ideas about what can and should do medical robots controlled by the physician in patient care have been revised. It is essential that today there are works on creation of surgical robots, allowing the doctor to carry out an increasing number of tasks without the expansion of the medical team, and without additional means of ensuring [8,9].

The robot «Da Vinci» consists of many tightly integrated with each other subsystems, including manipulators such as hands, devices for endoscopy, high resolution monitors, etc., which all together form the united system to perform a large set of surgical interventions. A unification of this type of devices leads to an increase both weight and size characteristics (for example, the robot «Da Vinci» weighs half a ton) and the demanding stationary accommodation, comfortable working conditions of physician and medical staff and so on. These circumstances limit "direct" carrying over of experience in the development of surgical robots like «Da Vinci» in the practice of manned flights. Does it follow from this that the question of application of robot-assisted emergency medical help cosmonauts in flight is not timely? Answering on this question it is necessary to have in mind the following. Indeed, to create a universal health robot-assistant, adapted to the full range of medical operations, which may be required on the board of the ISS in the interest of sick care for member of the crew, is rather difficult today. But for some extraordinary medical situations the use of a robotic assistant may be appropriate and even needed for vitally important reasons. In this case, under the choice of design and functionality of the medical robot on the board of the MSC, it is possible to find a compromise, i.e. to abandon the excessive flexibility and to narrow the set of robot-assisted operations.

In favor of seeking more compact (but specialized) solutions we can say that there are some developments different from «Da Vinci» on the ratio of the universalism / specialization, dimensions and weight, with a pronounced trend is to look for ways creating small robots [8,9]. From the domestic development of robotics systems (RCS) we can mention on the creation of a mechatronic device for outdoor chest compressions during cardiopulmonary resuscitation [10]. Great expectations of professionals are connected with the progress in the creation of more compact and functional robot-assistants for surgery, in particular, micro and nano robots [11, 12].

Prospects of robotics system use for cosmonauts' medical support on the board of the ISS

Some of the major theoretical and methodological achievements of the domestic aerospace medicine include results related to the prevention and correction of violations of health status and health of cosmonauts during the long fly with the use of on-board systems intended to create adequate load on the cardiovascular system, the musculoskeletal system, the system of external respiration et al. [13], as well as life-support systems for the construction of an artificial habitat for the MSC. Many scientific results of the implementation of space medicine have found their realization in the regenerative medicine and rehabilitation in the form of software and hardware systems operating on the principles of bio-feedback [13], as well as in the practice of training on simulators with the control of functional state of the human operator [14]. On this experimental and theoretical basis, robotic biotechnical systems for space purposes can be built. Robotic medical complexes of this type differ from those traditionally studied ergonomics systems “human operator - RCS - environment“ by that in the complicated system must be considered a new link - the patient, the condition of which may be affected by factors of the work environment, the physician (or his deputy), RCS medical devices, and bio-feedback allows to automate RCS [15]. With regard to clinical applications we can specify the original development of an apparatus for normothermic perfusion, which shows the ways of constructing artificial environment to ensure the viability of isolated organs [16].

For the aerospace medicine in consideration of the biotechnical system it must also be included such a component of the RCS as a complex of artificial gas environment creation based on hardware flow control gas mixtures [17]. In combination with metered mechanical impact on specific areas of the cosmonaut body (overpressure or, on the contrary, with the help of cavities, creating a vacuum and selective loading of the individual units of the musculoskeletal system using load costume) the bioadaptive respiratory support system can be considered as a non-drug treatment for correction of the functional state of physiological reserves and increase stress resistance to extreme influences. It is widely used in the practice of Russian medicine, for example, hypo-, hyper- and normobaric hypoxic interval [18]. Also we consider as a promising solution using hermetically isolated capsules apparatus on the board of the MSC for creating an artificial gas medium (with individually optimized parameters - temperature, gas mixture composition, the partial pressure of gases with additions of biologically active substances and so on). It is equipped with sensors for measuring the physiological parameters (blood pressure, pulse rate and respiration, blood oxygen saturation, the composition of exhaled air, etc.) and monitoring the results of the instrumental correction of the human condition on the principles of bio-feedback. The presented approach can be seen as the use of medical robotics technology for developing new generations of bioadaptive simulators.

Conclusion

Today we can claim about a significant potential of the use of medical and service robots in the manned space flight [19]. This article shows some special perspective areas of medical robot application in space medicine, although few experience of their actual use does not allow us to talk about substantial progress of their implementation in practice. In particular, despite the success of the application of robotics simulators on the ground, the question of their usage during actual space flights for the on-board trainings of the cosmonauts requires advanced studies, taking into account possible health risks and emergency medical situations. It should be a careful approach to selection of complexity indicators for executing on-board medical simulator and its functionality. Even harder problems arise at the implementation of manned space robot-assisted medical support of health interventions, including robot's weight and size characteristics and difficulties of RCS remote control by experts from the Mission Control Center. Finally, unique achievements of Russian aerospace medicine in the field of protective equipment for pilots and cosmonauts, as well as at construction of an artificial habitat environment for MSC, individual means for cosmonaut's safety require some adaptation for their implementation as a part of the adaptive robotic biotechnical complexes.

All mentioned above arguments are evidence of the necessity to further intensify the research in this interdisciplinary field involving results of advanced information technologies: computer science, automation, imitation modeling, simulation, robotics and mechatronics.

1. Ushakov, IB Onboard simulators based robot simulator to maintain in stand-alone long space flights of skills to perform medical interventions / IB Ushakov, AV Polyakov, VM Usov // Robotics and Artificial Intelligence: Proceedings of the V All-Russian Scientific and Technical. Conf. with international participation (Zheleznogorsk, November 15, 2013) / under scientific. Ed. V.A.Ugleva; Sib. Feder. Univ; Zheleznogorsky branch SFU. Krasnoyarsk: Information Center, SIC "Monograph", 2013. (184 pp.) S.43-45.
2. Kazakov, VF Simulation technology in virtual training doctors - organizational aspects, Realities and Prospects / VF Kazakov, PS Turzin // Proceedings of the III annual scientific-practical conference with international participation "Innovative medical technologies in the field of neurology and allied health professions", Moscow, 15.11.2011, the M .: mailer, 2012. 160 p.
3. Bubnov, VG Medical robot simulator for training of handling equipment / Bubnov VG Vinokurov NP Patent from 20.03.2003, № 2200979 // [electronic resource] URL: http://www.findpatent.ru/patent/220/2200979.html Free, date 04.04.2015.
4. Solis J., Oshima N., Ishii H., Matsuoka N., Hatake K., Takanishi A. (2008) Towards understanding the suture/ligature skills during the training process using WKS-2RII // Int J CARS 3: 231-239.
5. Noh Y., Segawa M., Shimomura A., Ishii H., Solis J., Hatake K., Takanishi A. WKA-1R Robot assisted quantitative assessment of airway management (2008) // International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery 3(6):543-550.
6. Robonaut 2 (R2) Overview by Myron Diftler, Nasa Technical Reports Server (Ntrs) // BiblioGov, July 29, 2013. 32 pp. electronic resource URL: http://www.chapters.indigo.ca/en-ca/books/robonaut-2-r2-overview/9781289251406-item.html Free, date 7.04.2015.
7. Diftler R. Robonaut the Robot Doctor Practices Telemedicine / NASA Space Science HD // Электронный ресурс URL: Coconut Science Lab: http://www.coconutsciencelab.com Free, date 17.01.2014.
8. Baena F.R., Davies B. Robotic surgery: from autonomous systems to intelligent tools. // Robotica 2010; 28(02): (special issue):163-170.
9. Taylor R.H., Stoianovici D. Medical robotics in computer-integrated surgery. // IEEE Trans Robotics Autom 2003; 19(5): 765-781.
8. Beasley Ryan A. Medical Robots: Current Systems and Research Directions // Journal of Robotics Volume 2012 (2012), Article ID 401613, 14 pages. URL: http://dx.doi.org/10.1155/2012/401613 Free, date 12.04.2014.
9. Lanfranco A. R., Castellanos A.E., Desai J.P., and Meyers W.C. Robotic Surgery. A Current Perspective // Ann Surg. Jan 2004; 239(1): 14–21.
10. Gryaznov, NA Promising electronic device for external chest compression with the ability to control the process of cardiopulmonary resuscitation of the human body / NA Gryaznov, DA Kochkarev, AI Modyagin, KY Senchik, FG Ushakov // Proceedings of the International Scientific and Technical Conference "Extreme Robotics". SPb.: Polytechnic service. 2011.
11. Savrasov GV Trends in the development of medical robotics // Biomedical electronics. 2007. № 10. C. 42-46.
12. Voronov, VV Adaptive control of micro robot for the diagnosis of tubular organs / VV War, AS Yushchenko // Questions of defense equipment. Ser. 16. 2005. Vol. 7-8. S. 103-108.

13. Grigoriev, AI Prospects for the introduction of technology in space medicine in clinical practice / AI Grigoriev, IB Kozlovsky // Klin. Herald "Kremlin Medicine." M., 2001. S.10-13.
14. Hooks, BI Features of the application of technical systems to train astronauts, engineers and psychological projection system "man - technology - environment" / BI Hooks, VM Usov // Biotechnosphere, №3. 2014. S.48-49.
15. Arkhipov, MV Ergatic and biotechnical control system in medical robotics / Arkhipov MV Golovin VF Zhuravlev VV // Mechatronics, Automation, Control, №5, M., 2011, p. 54-56.
16. Bagnenko, SF The continued viability of isolated donor organs using normothermic perfusion apparatus: the first experience of use in clinical practice / SF Bagnenko, ON Resnick, AE Skvortsov, AO Resnick, KY Senchik, AV Lopota // Proceedings of the International Scientific and Technical Conference "Extreme Robotics". St. Petersburg: Polytechnic service. 2011.
17. Sir, AM New equipment formation respiratory gas mixtures for functional exercise testing / AM Sir, IA Isaev, PS Cantor, EV Korotych, MV Janitors, IV Bukhtiyarov, VM Usov // Biomedical technology and electronics. 2005. № 11-12. S.52-58.
18. Ushakov IB Hypobaric version of interval hypoxic training in aerospace medicine / IB Ushakov, IN Chernyakov, AA Shishoff, NI Olenev // Military Medical Journal, 2003.№2. S.54-57.
19. Hooks, VI Conceptual approaches to the use of service robots: common implementation problems (on examples of manned spaceflight and high-tech medicine) / BI Kryuchkov, AA Karpov, AV Poles, DA Rogatkin, VM Usov // Biotechnosphere, 2013, №6, S.48-59.

И.Б. Ушаков[1], А.В. Поляков[1], А.А. Карпов[2], В.М. Усов [1]

МЕДИЦИНСКАЯ РОБОТОТЕХНИКА КАК НОВЫЙ ЭТАП РАЗВИТИЯ БОРТОВЫХ ТРЕНАЖЕРОВ ИБИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ОРБИТАЛЬНОЙ СТАНЦИИ

[1]*Государственный научный центр РФ – Институт медико-биологических проблем Российской академии наук (ИМБП РАН), г. Москва,*
iushakov@imbp.ru; apolyakov@imbp.ru; vitali1946usov@yandex.ru
[2]*Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН), г. Санкт-Петербург, karpov@iias.spb.su*

Введение

Одним из мероприятий медицинского обеспечения пилотируемых космических полетов являются бортовые тренировки, направленные на снижение влияния негативного воздействия факторов космического полета на организм человека и на подготовку космонавтов к возвращению в «привычные» земные условия обитания. Кроме этих, выполняемых на постоянной основе мероприятий, на Международной космической станции (МКС) периодически проводятся тренировки, направленные на повышение готовности членов экипажа: 1) к выживанию и спасению в экстремальных условиях при отказах техники и аварийных ситуациях; 2) к оказанию медицинской помощи при возникновении нештатных медицинских ситуаций (заболеваний и травм) и при возрастании рисков снижения работоспособности членов экипажа. Учитывая важность медицинских задач, решаемых экипажем в полете, актуально рассмотрение вопросов расширения арсенала доступных на борту средств оказания медицинской помощи и медицинского обеспечения в целом. При этом, в разряд перспективных должны быть включены не только традиционные медицинские лечебно-диагностические аппараты и приборы, но и изделия, построенные на технологиях робототехники и информатики. Особенно значимо их использование в ситуациях, когда получение экипажем консультативной поддержки медицинских специалистов затруднено из-за условий автономного полёта и медицинские мероприятия экипаж должен осуществлять на борту пилотируемого космического аппарата (ПКА) самостоятельно, опираясь только на собственные силы, умения и навыки.

Новые направления применения медицинских роботов в пилотируемой космонавтике

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 заболеваниях и травмах у членов экипажа.

3. Создание (в развитие существующих медицинских технологий профилактики нарушений состояния здоровья космонавтов) 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.

Каждое из перечисленных направлений имеетсвои особенности, и сегодня важно провести систематизацию вариантов применения медицинских роботов в пилотируемой космонавтике в дополнение к роботам-помощникам экипажа, планируемых для выполнения профессиональных задач и работы с полезной нагрузкой на ПКА.

Проведение в полете медицинских тренировок с использованием бортовых тренажеров, построенных на базе роботов-симуляторов

В работе [1] отмечена актуальность применения новых медицинских и информационных технологий, которые могли бы снизить риски появления у экипажа непреднамеренных ошибок, связанных с потерей в полете практических навыков выполнения медицинских мероприятий.

В последнее время при подготовке профессионалов в различных направлениях деятельности отмечается полезность использования симуляционных технологий [2]. В частности, набор врачебных процедур и приемов, которые оказалось возможным отрабатывать и оценивать с применением современных роботов-симуляторов, на сегодня оказался достаточно обширен и, в первую очередь, он охватывает области хирургии, анестезиологии и реаниматологии, первой медицинской помощи. Предпосылки применения этих технологий для медицинских тренировок на борту ПКА состоят в следующем:

– Использование современных симуляционных технологий позволит организовать в длительном космическом полете тренировки, направленные на формирование и поддержание у экипажа навыков выполнения медицинских приемов и процедур, включая инвазивные, средства и инструментарий для выполнения которых имеются на РС МКС в составе бортовой медицинской аптечки и медицинских укладок.
– Развитие обучающих технологий открывает новые возможности для получения космонавтами мануальных навыков, значимых для применения в условиях автономного полета при необходимости оказания неотложной медицинской помощи членам экипажа (в порядке само- и взаимопомощи).

Одним из перспективных вариантов организации обучения и тренировок на РС МКС может стать использование бортовых тренажеров, построенных на базе технологий виртуальной реальности и/или сконструированных в виде роботов-симуляторов. Способ медицинских тренировок на роботах-симуляторах особенно оправдан в ситуациях, когда исполнительный компонент подразумевает развитое «мышечное чувство», правильное техническое исполнение приемов с учетом анатомических соотношений и близости к области манипуляций жизненно важных органов, крупных сосудов, нервных стволов и т.п. В этих случаях также важны знания и представления о сопротивлении различных тканей организма механическому воздействию при использовании медицинских инструментов.

Кроме того, во многих ситуациях, выполняя мероприятия, связанные с рисками для здоровья пациента и потенциальными врачебными ошибками, исполнитель ориентируется на получение «обратных» связей от пациента, включая непроизвольные реакции его организма и речевую передачу «пациентом его ощущений», что возможно имитировать на роботах-симуляторах.

Для выработки и поддержания у космонавтов в полете навыков выполнения медицинских приемов и процедур целесообразно: а) жестко ограничить сценарии наиболее типичными и наиболее вероятными случаями (нештатными медицинскими ситуациями);б)сосредоточить внимание обучаемых на правильности, точности и быстроте исполнительных действий при выполнении соответствующих приемов для купирования вероятных нештатных медицинских ситуаций; в) исходить из наличия и правильного подбора медицинского инструментария на МКС. Также для этих целей могут быть использованы бортовые средства информационной поддержки с использованием технологии дополненной реальности.

В обширной литературе, посвященной созданию медицинских роботов, имеются описания медицинских симуляторов, используемых для выработки и поддержания практических навыков выполнения типичных процедур и манипуляций.

Так, например, в работе [3] с использованием медицинского тренажера-симулятора решается задача обучения техническим приемам венесекции, катетеризации и венепункции. Кроме того, имеются публикации, в которых обязательным компонентом обучающих сценариев рассматривается изучение приемов обеспечения проходимости дыхательных путей и оказание медицинской помощи при ранениях: местной анестезии, хирургической обработки ран и наложения швов [4,5].Описанный в работе [4] медицинский тренажер для оценки наложения швов позволяет в процессе наложения швов на симуляторе измерять прилагаемые при этом усилия. Соответствующие устройства съема (тензометрические датчики) и передачи сигналов имплантируются в робот-симулятор. В другом изделии –антропоморфном симуляторе, предназначенном для обучения поддержанию проходимости дыхательных путей и тренировок по выполнению интубации, также имеются имплантированные тензометрические датчики, для измерения прилагаемого усилия [5].Когда обучаемый на тренажере выполняет интубацию, измеряются приложения сил в области зубов, височно-нижнечелюстного сустава, на язык и др. Дополнительно, в качестве обратной связи вычисляется производительность легочной вентиляции по измеренным значениям. С конструктивной и методической точки зрения существенно, что для этого тренажера предусмотрено изменение геометрических соотношений его приводов, которые расположены в анатомических областях височно-нижнечелюстного сустава и шеи. Это позволяет осуществлять контроль сопротивления при проведении интубации при разных анатомических соотношениях дыхательных путей у пациента. Реализуя эту функцию, тренажер может имитировать «пациента» с замкнутой челюстью, с маленькими и большими челюстями, при мышечных спазмах, то есть с теми особенностями, которые определяют трудности выполнения интубации. Используя эти возможности при планировании подготовки на тренажере симуляторе к выполнению процедур у конкретных пациентов можно заранее уточнить антропометрические показатели и соответственно выполнить настройку тренажера.

В качестве перспективной программы развития бортовых тренажеров на базе технологий 3D-визуализации и роботов-симуляторов предлагается рассмотреть следующий перечень медицинских приемов и методов, которой должен составлять основу компетенций космонавта по проведению неотложных мероприятий таких как: первичная реанимация; внутривенное введение лекарственных препаратов; дефибриляция; катетеризация мочевого пузыря; иммобилизация конечностей при травмах; приёмы извлечения инородных тел (глаза, уха, горла, носа);обработка раневых поверхностей и др. Конкретизируя в дальнейшем этот перечень, можно значительно сузить поиск наземных прототипов, которые могли бы стать основой для бортового (полетного) медицинского тренажёра на базе робота-симулятора.

Завершая характеристику возможных направлений применения медицинских роботов для построения бортовых тренажеров, следует упомянуть и такую возможность, как применение роботов-симуляторов совместно с дистанционно управляемыми манипуляционными роботами для выполнения хирургического вмешательства на борту ПКА, выполняемое в режиме телеуправления с Земли.

О возможности такого применения американского антропоморфного робота Robonaut-2 на МКС имеются упоминания в интервью испытателей его аналогов в клинических условиях [6,7].

В общей постановке возможность применения робот-ассистированной хирургии на борту ПКА рассмотрено в следующем разделе.

Применение в пилотируемом полете медицинских роботов для робот-ассистированной хирургии

Сегодня большая часть публикаций, посвященных медицинским роботом, относится к вопросам робот-ассистированной хирургии. Закономерен вопрос, в каком объеме возможен перенос этих технологий на борт ПКА?Если обратиться к наземным прототипам и аналогам, то можно отметить следующее. Именно способность выполнять манипуляции специализированными инструментами, построенными и функционирующими по принципу строения человеческой руки и кисти, положена в основу применения хирургических манипуляционных роботов. С их появлением начался новый этап развития медицинской науки, были пересмотрены многие, казалось бы, незыблемые представления о том, что могут и что должны делать медицинские роботы под контролем врача при оказании медицинской помощи пациентам. Существенно, что сегодня проводятся работы по созданию хирургических роботов, позволяющих врачу осуществлять все большее число задач без расширения состава врачебной бригады и без привлечения дополнительных средств обеспечения[8,9].

В составе робота «Da Vinci» имеется множество тесно интегрированных друг с другом подсистем, в том числе, манипуляторов типа кисти человека, устройств для эндоскопии, мониторов высокого разрешения и пр., что составляет единую систему для выполнения большого набора хирургических мероприятий. Универсализация такого типа устройств приводит к росту массогабаритных характеристик (например, робот «Da Vinci» весит полтонны) и к жестким требованиям к стационарности размещения, комфортности условий работы врача и обслуживающего персонала и пр. Это обстоятельство ограничивает «прямой» перенос опыта разработки хирургических роботов типа «Da Vinci» в практику пилотируемых полетов. Следует ли из этого, что постановка вопроса применения робот-ассистированной неотложной медицинской помощи космонавтам в полете является не своевременной? При ответе на этот вопрос необходимо иметь в виду следующее. Действительно, создать универсального медицинского робота-ассистента, адаптированного ко всему спектру медицинских операций, которые могут потребоваться на борту МКС в интересах оказания медицинской помощи заболевшему члену экипажа, сегодня представляется затруднительным. Но для некоторых «нештатных» медицинских ситуаций применение робота-ассистента может оказаться целесообразным и даже остро необходимым по жизненным показаниям. В этом случае при выборе конструкции и функциональности медицинского робота на борту ПКА возможен компромиссный путь– отказ от избыточной универсальности и сужение набора робот-ассистированных операций.

В пользу поиска более компактных (но специализированных) решений говорит то обстоятельство, что имеются отличные от «DaVinci» разработки по соотношению показателей универсализм/специализация, по габаритам и массе, причем выраженным трендом является поиск путей создания малогабаритных роботов [8,9].Из отечественных разработок робототехнических комплексов (РТК) необходимо выделить создание мехатронного аппарата для наружной компрессии грудной клетки при проведении сердечно-легочной реанимации[10]. Большие ожидания специалистов связаны с прогрессом в области создания все более компактных и более функционально развитых изделий робот-ассистированной хирургии, в частности, с микро- и нанороботами[11,12].

Перспективы применения роботизированных биотехнических комплексов для медицинского обеспечения космонавтов на борту МКС

В число значительных теоретических и методических достижений отечественной авиакосмической медицины входят результаты, связанные с профилактикой и коррекцией нарушений состояния здоровья и работоспособности космонавтов в условиях длительных полётов с применением бортовых комплексов, предназначенных для создания адекватных нагрузок на сердечно-сосудистую систему, опорно-двигательный аппарат, систему внешнего дыхания и др.[13], а также систем жизнеобеспечения для построения искусственной среды обитания на ПКА. Многие научные результаты космической медицины нашли реализацию в области восстановительной медицины и медицинской реабилитации в виде программно-аппаратных комплексов, функционирующих на принципах биологической обратной связи[13], а также в практике подготовки на тренажерах с контролем функционального состояния человека-оператора [14]. На этой экспериментально-теоретической основе могут быть построены роботизированные биотехнические комплексы космического назначения. Роботизированные медицинские комплексы такого типа отличаются от традиционно рассматриваемых эргатических систем «человек-оператор – РТК – среда» тем, что в сложной системе необходимо учитывать новое звено – пациента, на состояние которого могут оказывать влияние факторы рабочей среды, врач (или лицо, его замещающее), РТК медицинского назначения, а биологическая обратная связь позволяет до определенной степени автоматизировать воздействия РТК [15].Применительно к клиническим приложениям можно указать на оригинальную разработку аппаратной нормотермической перфузии, которая показывает способы построения искусственной среды для обеспечения жизнеспособности изолированных органов [16].

Для авиационно-космической медицины в рассмотрение состава биотехнической системы необходимо дополнительно вводить такой компонент РТК, как комплекс создания искусственной газовой среды на основе аппаратуры управления подачей газовых смесей [17]. В сочетании со средствами дозированного механического воздействия на конкретные области тела космонавта (созданием избыточного давления или, напротив, с помощью полостей, создающих разряжение, а также выборочным нагружением отдельных звеньев опорно-двигательного аппарата с помощью нагрузочного костюма) биоадаптивная система респираторной поддержки может рассматриваться в качестве немедикаментозного средства лечения, коррекции функционального состояния, повышения физиологических резервов и стресс-устойчивости к экстремальным воздействиям, что широко применяется в практике отечественной медицины, например, гипо-, гипер- и нормобарической интервальной гипокситерапии[18].Как перспективное решение может рассматриваться применение на борту ПКА герметически изолированной капсулы с аппаратурой для создания искусственной газовой среды (с индивидуально оптимизированными параметрами – по температуре, составу газовой смеси, парциальному давлению газов, с добавками биологически активных субстанций и пр.), оснащенной оборудованием для измерения физиологических параметров (артериальное давление, частота пульса и дыхания, насыщение крови кислородом, состав выдыхаемого воздуха и пр.) и контроля результатов аппаратурной коррекции состояния человека на принципах биологической обратной связи. Представленный подход может рассматриваться как применение технологий медицинской робототехники при создании новых поколений биоадаптивных тренажеров.

Заключение

Сегодня можно с уверенностью говорить о значительном потенциале использования медицинских и сервисных роботов в пилотируемой космонавтике[19]. В данной работе показаны перспективные специальные направления применения медицинских роботов в области космической медицины, хотя небольшой опыт их реального использования не позволяет с уверенностью говорить о существенном прогрессе их внедрения в практику. В частности, несмотря на успехи применения роботов-симуляторов в наземных условиях, вопрос их использования в реальном космическом полете для бортовых тренировок космонавтов требует дополнительного изучения с учетом возможных медицинских рисков и перечня возможных нештатных медицинских ситуаций. При этом следует особенно тщательно подойти к выбору показателей сложности исполнения бортового медицинского тренажера и его функциональности. Не меньшие проблемы возникают при внедрении в область пилотируемой космонавтики робот-ассистированной медицинской поддержки выполнения медицинских мероприятий, так как в число факторов, ограничивающих возможности внедрения, входят массогабаритные характеристики РТК и трудности дистанционного управления РТК специалистами из Центра управления полетом. Наконец, уникальные достижения отечественной авиакосмической медицины в области создания защитного снаряжения летчика и космонавта, а также построения искусственной среды обитания на ПКА, индивидуальных средств жизнеобеспечения космонавта, бортовых средств профилактики и др. требуют определенной адаптации для их воплощения в составе адаптивных роботизированных биотехнических комплексов.

Все вышесказанное свидетельствует о необходимости интенсификации дальнейших исследований в данной междисциплинарной области знаний, предполагающей применение передовых информационных технологий: информатики, автоматизации, имитационного моделирования, тренажеростроения, робототехники и мехатроники.

1. Ушаков, И.Б. Бортовые тренажеры на основе робота-симулятора для поддержания в автономных длительных космических полетах навыковвыполнения медицинских мероприятий / И.Б. Ушаков, А.В. Поляков, В.М. Усов// Робототехника и искусственный интеллект: Материалы V Всероссийской научно-техн. конф. с международным участием (г. Железногорск, 15 ноября 2013 г.) / под науч. ред. В.А.Углева; Сиб. федер. ун-т; Железногорский филиал СФУ. Красноярск: Центр информации, ЦНИ «Монография», 2013. (184 с.) С.43-45.
2. Казаков, В.Ф. Симуляционные технологии в виртуальном обучении врачей-организационные аспекты, реалии и перспективы / В.Ф. Казаков, П.С. Турзин// Материалы III ежегодной научно-практической конференции с международным участием «Инновационные медицинские технологии в области неврологии и смежных медицинских специальностей», г. Москва, 15.11.2011 г. М.: МЭЙЛЕР, 2012. 160 с.
3. Бубнов, В.Г. Медицинский робот-тренажер для обучения манипуляционной технике / Бубнов В.Г., Винокуров Н.П. Патент от 20.03.2003 г. № 2200979 // [Электронный ресурс] URL: http://www.findpatent.ru/patent/220/2200979.htmlДоступ свободный, дата 04.04.2015 г.
4. Solis J., Oshima N., Ishii H., Matsuoka N., Hatake K., Takanishi A. (2008) Towards understanding the suture/ligature skills during the training process using WKS-2RII // Int J CARS 3:231-239.
5. Noh Y., Segawa M., Shimomura A., Ishii H., Solis J., Hatake K., Takanishi A. WKA-1R Robot assisted quantitative assessment of airway management (2008) // International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery 3(6):543-550.
6. Robonaut 2 (R2) Overview by Myron Diftler, Nasa Technical Reports Server (Ntrs) // BiblioGov, July 29, 2013. 32 pp.Электронный ресурс URL:http://www.chapters.indigo.ca/en-ca/books/robonaut-2-r2-overview/9781289251406-item.htmlДоступсвободный, дата 7.04.2015г.
7. Diftler R.Robonaut the Robot Doctor Practices Telemedicine / NASA Space Science HD // Электронныйресурс URL: Coconut Science Lab: http://www.coconutsciencelab.com Доступсвободный, дата 17.01.2014 г.
8. Baena F.R., Davies B. Robotic surgery: from autonomous systems to intelligent tools. // Robotica 2010; 28(02): (special issue):163-170.
9. Taylor R.H., Stoianovici D. Medical robotics in computer-integrated surgery. // IEEE Trans Robotics Autom 2003; 19(5): 765-781.
10. Beasley Ryan A. Medical Robots: Current Systems and Research Directions // Journal of Robotics Volume 2012 (2012), Article ID 401613, 14 pages. URL: http://dx.doi.org/10.1155/2012/401613доступсвободный, дата 12.04.2014 г.
11. Lanfranco A. R., Castellanos A.E., Desai J.P., and Meyers W.C. Robotic Surgery. A Current Perspective // Ann Surg. Jan 2004; 239(1): 14–21.
12. Грязнов, Н.А. Перспективный мехатронный аппарат для наружной компрессии грудной клетки с возможностью контроля процесса сердечно-легочной реанимации организма человека/ Н.А. Грязнов, Д.А. Кочкарев, А.И. Модягин, К.Ю. Сенчик, Ф.Г. Ушаков // Труды международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника». СПб.: Политехник-сервис. 2011 г.

13. Саврасов Г.В.Тенденции развития медицинской робототехники // Биомедицинская радиоэлектроника. 2007. № 10. С. 42-46.
14. Войнов, В.В. Адаптивное управление микророботом для диагностики трубчатых органов / В.В. Войнов, А.С. Ющенко // Вопросы оборонной техники. Сер. 16. 2005. Вып. 7-8. С. 103-108.
15. Григорьев, А.И. Перспективы внедрения технологий космической медицины в клиническую практику / А.И. Григорьев, И.Б. Козловская // Клин. Вестник «Кремлевская Медицина». М., 2001. С.10-13.
16. Крючков, Б.И.Особенности применения биотехнических систем для подготовки космонавтов и инженерно-психологического проектирования системы «человек – техника – среда» / Б.И.Крючков, В.М. Усов // Биотехносфера, №3. 2014.С.48-49.
17. Архипов, М.В.Эргатические и биотехнические системы управления в медицинской робототехнике / Архипов М.В., Головин В.Ф., Журавлев В.В. // Мехатроника, автоматизация, управление, №5, М., 2011, с. 54-56.
18. Багненко, С.Ф. Сохранение жизнеспособности изолированных донорских органов с помощью аппаратной нормотермической перфузии: первый опыт применения в клинической практике / С.Ф. Багненко, О.Н. Резник, А.Е. Скворцов, А.О. Резник, К.Ю. Сенчик, А.В. Лопота // Труды международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника». СПб: Политехник-сервис. 2011 г.
19. Сударев, А.М. Новая аппаратура формирования дыхательных газовых смесей для функционально-нагрузочных проб / А.М. Сударев, И.А. Исаев, П.С. Кантор, Е.В. Коротич, М.В. Дворников, И.В. Бухтияров, В.М. Усов // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. 2005. № 11-12. С.52-58.
20. 18.Ушаков, И.Б.Гипобарический вариант интервальной гипоксической тренировки в авиакосмической медицине / И.Б. Ушаков, И.Н. Черняков, А.А. Шишов, Н.И. Оленев // Военно-медицинский журнал, 2003.№2. С.54-57.
21. Крючков, Б.И.Концептуальные подходы к применению сервисных роботов: общность проблем внедрения (на примерах пилотируемой космонавтики и высокотехнологической медицины) / Б.И. Крючков, А.А. Карпов, А.В. Поляков, Д.А. Рогаткин, В.М. Усов // Биотехносфера, 2013, №6, С.48-59.

R. Bogacheva, A. Zonov, V. Konyshev

PROSPECTS OF THE USE OF THE SOCIAL ROBOTS FOR PSYCHOLOGICAL AND INFORMATIONAL SUPPORT OF ASTRONAUTS DURING LONG-TERM SPACE FLIGHTS

Neurobotics, Zelenograd, Moscow, Russia
r.bogacheva@neurobotics.ru, a.zonov@neurobotics.ru, v.konyshev@neurobotics.ru

Nowadays robots surround people everywhere – at home, outdoors, in the shop, and so on – it comes to smartphones, smart home appliances (consumer electronics), robot cleaners, robot surgeons, robots for telepresence, industrial manipulators (such as robots for machine assembly, production sorters, robotic packers), educational robotic kits, robots butlers, robotic art objects, animatronic robots and so on.

Social robots are used for communication and help people at home or in the public places and it may be robots-babysitters, nurses, psychologists, butlers, clerks, tutors, promoters, hosts and telepresence robots for people with disabilities.

Among the most prominent representatives of up-to-date social robots worth be mentioned such ones as Nao, Pepper and Romeo – robot from French company AldebaranRobotics, robot barman ARMAR, household helper HSR, robot-fireman Octavia, Babyloid – robot that simulates the behavior of the child who need constant care, robot seal that needs constant caress – Paro, Japanese android girl HRP-4C that starred in the music videos and able to sing songs, Japanese robot actor Wakamaru and English robot actor Thespian. Among Russian social robots the most popular are the followings: R.Bot, PromoBot, WeBot, Cubic, The Gingerbread Man (“Kolobok”), anthropomorphic robots with a portrait likeness (similarity, resemblance) from Neurobotics: A. Pushkin, Alisa Zelenogradova, Oleg, A. Turing and others. They might be used as “live audiobook”, chat bot or telepresence robot.

The appearance of the robot is usually primarily caused by its functional abilities: so, it doesn’t matter how the military or medical robot looks like – the main goal here is preciseness and quickness of its functioning. For instance, robot sapper, using in rough terrain – the accurate arm, mounted on a tracked platform. In order to inspire confidence, devices, which are actively interacting with people, should be to some extent similar to humans.

Nowadays space robots are created both for internal ship activities and extra ship activities. If the robot serves for extra ship activities, its appearance does not play significant role – the robot does not communicate with astronauts.

Astronaut has to be functionally and psychologically prepared to interact with the robot whose appearance is far from anthropomorphic. At the same time, if the robot is supposed to work onboard, it's appearance is much more important. Provisionally, it should be anthropomorphic because it has to inspire credibility and be predictable for the crew.

Antropomorphic robot must be able to operate in several modes: interactive (under the control of an operator using a joystick, exoskeleton, etc.) and offline (supervisory) under the control of the operator of the Control Center or an astronaut. In order to build an effective communication between the crew and the anthropomorphic robot in space it is necessary to carry out additional preparations of the astronauts:

crew must be prepared for such "communication" (to know its possibilities and limitations, distinct features of robot's behavior, etc.);

to study in detail the individual characteristics of the members of the crew (temper, temperament, interests, circle of friends, family, etc.).

the robot must "know" initial, typical and individual features of behavior (habits) of each member of the crew and be sure to take them into account in the process of "communication", assessment of their current status and its correction;

create and use individual programs of the robot's behavior to communicate with each member of the crew;

use in communicative act set of various themes (functional music, voice letters, color and visual themes, photos, voices of friends and family, psychoregulating exercises, surprises, etc.).

Specialists of the Cosmonaut Training Center had developed criteria for necessity and possibility of introducing robots into the flight operations of manned spacecraft [3]. As a result, it is recommended to use anthropomorphic robots in number of cases: emergency conditions threatening to life and health of the astronauts; threat to flight program; necessity to perform laborious and monotonous operations or operations requiring great physical load that exceeds of astronauts' liabilities; when the duration of the work in the open space exceeds the allowed residence time for astronauts in spacesuits. In this case the ability to perform flight operations by the anthropomorphic robot for space applications largely depends on the following reasons: the degree of determinateness of flight operations; structure and functionality level of the anthropomorphic robot; the ability to navigate and movement in the internal volume of the space station and on its surface; technical characteristics; evolving physical efforts, degrees of mobility; the availability of appropriate working tools and opportunities for its use by an anthropomorphic robot.

Due to the continuous improvement of space robotics and limited opportunities of astronauts, it can be said that already in the short term future space robots may become quite effective in the number of areas. It is also necessary to take into account the following circumstances: space robots do not need clothes and hygiene, variety of food, they are not affected by emotions, etc. However, the robots have their own drawbacks: they can break, require maintenance and power supply, it is difficult and sometimes impossible to perform intellectual and creative operations, as well as to work in poorly deterministic environment. Perhaps these flaws will be corrected or minimized in the coming decades, but at this moment joint work of an astronaut and a robot for space operations seems to be the most effective application of last ones.

ISS has already been visited by two models of humanoid robots for internal ship activities: Kirobo and Robonaut2.

Robonaut 2, developed by GM by request of NASA, was the first anthropomorphic space robot. The robot consists of a torso with head and hands, which has been fixed on the platform. The robot was delivered on the ISS in March 2011. His appearance till this moment has been changed - it received adapted for movement on the station feet.

Japanese anthropomorphic mini robot Kirobo was delivered to the ISS in August of 2013 and looks like a child. It's 34 cm height and its weight is 1 kg. Mini robot is equipped with a voice recognition system and word processing unit, a speech synthesizer, a video camera for recording images, face recognition unit, and is able to move and navigate in weightlessness onboard the ship. In addition to psychological support to the crew robot also acted as a link (the communicator) between crew members, between the astronauts and the Mission Control Center, between the astronauts and technical systems, between the astronauts and its double – mini robot Mirata. On 11th February of 2015 Kirobo has been returned to the Earth, the mission considered as a successful; mini robot twice entered the Guinness Book of Records.

Among the other most successful world developments stand out: Valkyrie (NASA), SAR 400 and 401 NGO "Androidnaya technica», Justin (German Space Agency DLR), and others. Generally, these robots have a limited functionality and in general are served for mechanical work. In the second half of 2014 TSNIIMASH commissioned Neurobotics to develop a brand-new robot – Andronaut – which will work not only as a assistant to the crew (both in standalone mode and "avatar" mode), but will also provide information and psychological support for the crew members. Tasks related to the mechanical work on the Station remain typical, but at the same time tasks related to the psychological and informational support of the crew becoming more and more complex.

Thus, to provide assistance information for the crew robot will know the scheme of the space station, location of all of the components of the control system, location of cargo, etc. and will be able to help astronauts to find required objects. Andronaut will be provided with extensive database to provide crew members with all necessary information and the ability to connect to the electronic resources; recognition of images, including faces and emotions of people, as well as voice and speech, a wide range of entertainment opportunities based on chat bot technology and augmented reality glasses.

Augmented reality glasses will allow transfer to the astronauts the next kinds of information:

- Status of the physical parameters of the organism under different loads (including training);
- The instructions for the repair and maintenance of complex parts;
- Encourage information (for example, within the psychological support);
- Data from the chat-bot at the time of communication;
- Confidential or personal information;
- Leisure-time information, such as: video (records of important events, family chronicles, movies), games (partially or fully virtual), etc.

Andronaut will as well be able to produce general and personal training cyclogram for astronaut's professional skills support and recovery in case of long-term space station stay. This can be implemented in autonomous mode with intermediate testing of professional knowledge. In case when the test is passed with low rating, Andronaut suggests a learning course for missing information recovery.

An important part of robot functional is the detection of deviations in austronauts' condition or mood basing on their face analysis and estimation. To achieve this robot is supported with face identification software (face expression, lip articulation, head pose). It is assumed that given the portraits of the crew members a trained robot will not only recognize them but also detect the symptoms of tension, tireness or irritation on their faces, make appropriate derivations and even initiate some appropriate forms of conversation. Usually the psychological support is remote and brought to the astronauts through means of tele- and radio communications, however, using a social robot for this purpose will give the crew members an opportunity to choose any suitable time for conversation as well as its subject and duration. Robot can vary its "temperament" and "mood" settings considering the particular recognized austronaut, his preferences and current emotional state, it can communicate verbally and nonverbally. Moreover the psychologists will be able to communicate with astronauts via robot in telepresence mode if necessary.

A social robot will be able to act as a psychologist, informer, personal coach, stuff (rubbish cleaner, food cooker etc) or a companion for the routine work, and in case of emergency, the Andronaut body can be used for execution of the operations which are dangerous for a human. All these require a robot to have an anthropomorphous appearance as in some cases it will lead to more effective operation, among all, due to nonverbal communication and trust. In other cases like manipulation via exoskeleton the anthropomorphous feature is necessary. Therefore, the idea of a social anthropomorphous robot is a perspective formal implementation of all state-of-art technologies supplying robot interaction with objects and its space orientation, as well as more effective communication with crew members and reaching the required goals.

The permissible degree of anthropomorphism is often being debated in scientific and academic circles. Opponents of the human-robot appearance refer to the effect of "Uncanny valley". In the 1970s, Japanese scientist Masahiro Mori published an article [1], where he offered a plot of the people's reactions to robots according to their external similarity with the man and called it «Uncanny valley». The article does not say anything about the studies which were carried out and how they were carried out; author relies mainly on his perception of prostheses, industrial robots and humanoid toys, as well as to postulate that most things in human life, including the attitude to something else, is possible to express as the function y = f (x).

According to Masahiro Mori, such effect arises from the fear of death: after certain degree of external likeness the person begins to perceive the object as a living creature of its own kind with abnormalities and it causes disgust and horror. As a result, Mori recommends to designers not to seek to clearly replicate human's appearance in robot's exterior.

However, when we talk about anthropomorphic robots, there isn't any clear border between "beautiful" and "terrible". So, employees of Neurobotics not once seen that the more beautiful and more human-like robot, the greater interest it causes, especially between elderly people and kids – people starting to talk with him, touch him and to make photos. It was also noted that even if the first reaction was negative, it was going to change after a short conversation with the robot. Moreover, if the person hold near the robot for more than 10 minutes, he was getting used to it and stopped to pay attention to the robot's appearance.

In Andronaut case we have decided do not focus on very close anthropomorphic appearance as we did in case of android robots with portrait look (like for Pushkin, Turing, Alice robots) but rather concentrate on robots proportions similar to human ones, for example, eyes and hands and head location, size and proportions. That requirement greatly restricts possible solutions from variety of all possibilities. Let us consider restrictions applied to robot head, related to its vision and mimics. Firstly, distance between robots eyes with built-in cameras should be appropriate for binocular display to human operator vision system. Secondly, robot's face should be used for non-verbal communication with humans by displaying various emotions. But eyes presence on robot upper face area doesn't allow us to incorporate LED display to show mimics. As a result, the solution was chosen to add bright LEDs around eye to express emotions using various colors and patterns.

Furthermore, modern doll robots for adults quite precisely replicate the appearance and actions of real people, but at the same time, it's visibly that they aren't real. However, they aren't subjects to the "Uncanny valley" effect. In this way, we can assume that the perception of the anthropomorphic robot depends not only on their appearance, situational context, people's interest in their work, but also on the personal characteristics of each person and the degree of habituation. Research in this area also will be repeatedly carried out in future, and its results will allow robotics and industrial designers of the future to decide whether it is necessary to develop and produce anthropomorphic robots and for which purposes they will serve.

1. Mori M. The Uncanny Valley [electronic resource]: http://www.androidscience.com/theuncannyvalley/proceedings2005/uncannyvalley.html, (The date of circulation: 9.06.2015).
2. Bogacheva R., Supotnitsky A. The first steps and perspectives of development of communication and psychological support for astronauts with the help of social robots // Humanitarian Informatics number 9, 2015. P. 119-127.
3. Burdin B., Mikhailyuk M., Sokhin I., Torgashev M. The use of virtual models of 3D-models for the experimental testing of onboard flight operations performed by means of anthropomorphic robots // Proceedings of the 7th International Symposium "Extreme Robotics = robotics for work in hazardous environments" (St. Petersburg). October 2-3, 2013. The C-P .: University of Technology Service, 2013. 221 pp.
4. Zilberman N. Functional classification of social robots [electronic resource]. http://www.huminf.tsu.ru/wordpress/wp-content/uploads/zilberman_nn/2014/функциональная-классификацич-социальных-роботов.pdf, (The date of circulation: 06.10.2015).

Р.А. Богачёва, А.А. Зонов, В.А. Конышев

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СОЦИАЛЬНЫХ РОБОТОВ ДЛЯ ПСИХОЛОГИЧЕСКОЙ И ИНФОРМАЦИОННОЙ ПОДДЕРЖКИ КОСМОНАВТОВ В ДЛИТЕЛЬНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ПОЛЕТАХ

ООО «Нейроботикс», Зеленоград,
r.bogacheva@neurobotics.ru, a.zonov@neurobotics.ru, v.konyshev@neurobotics.ru

В последние 10-15 лет в мире наметился рост не только военной, медицинской, бытовой и промышленной робототехники, но также социальной, развлекательной и образовательной. Роботы окружают современного человека повсюду: дома, на работе, на улице, в магазине и т.д. – смартфоны, умная бытовая техника, пылесосы, машины для чистки бассейна, роботы-хирурги, роботы телеприсутствия, промышленные манипуляторы (собирающие машины, сортирующие объекты, упаковывающие товары), образовательные роботизированные конструкторы для сборки и программирования, роботы дворецкие, роботизированные арт-объекты и аниматроники и т.д.

Социальные роботы используются для общения и помощи людям, находящимся дома или в публичных местах, это могут быть: няни, сиделки, психологи, дворецкие, секретари, репетиторы, промотеры, ведущие, аниматоры, роботы телеприсутствия для людей с ограниченными способностями и др. [4]

Среди наиболее ярких представителей современных социальных роботов можно выделить: Nao, Pepper и Romeo французской компании Aldebaran Robotics, робот-бармен ARMAR, уборщик и помощник по дому HSR, робот-пожарный Octavia, робот Babyloid, имитирующий поведение ребёнка, за которым нужен постоянный ход, робот-тюлень Paro, нуждающийся в ласке, японская девушка-андроид HRP-4C снимается в клипах и поет, японский робот-актер Wakamaru, английский робот-актер Теспиан, среди российских социальных роботов наиболее популярны: R.Bot, PromoBot, WeBot, Cubic, Колобок, антропоморфные роботы с портретным сходством компании «Нейроботикс»: А.С. Пушкин, Алиса Зеленоградова, Олег, А. Тьюринг и др. могут работать, как в режиме «живой аудиокниги», так и чат-бота, и робота телеприсутствия.

Внешний вид робота обусловлен прежде всего его функционалом, так, военные и медицинские роботы могут выглядеть как угодно, если это идет на пользу точности и скорости их работы, например, робот-сапер, работающий в условиях пересеченной местности – это точный манипулятор, закрепленный на гусеничной платформе; устройства, активно взаимодействующие с человеком, должны быть до определенной степени похожими на людей, чтобы сходным образом ориентироваться в мире и быть безопасными, а также вызывать доверие.

В наши дни космические роботы создаются для внутрикорабельной и внекорабельной деятельности. Внешность робота, занимающегося внекорабельной деятельностью, не имеет особого значения, если он практически не взаимодействует или слабо взаимодействует с космонавтами. В противном случае для совместной работы потребуется более сложная специальная подготовка. Космонавт должен быть функционально и психологически готов к взаимодействию с роботом, конструкция которого отличается от антропоморфной. Облик робота для внутрикорабельных действий, напротив, важен, он должен быть, по всей видимости, антропоморфным, так как такой робот будет постоянно находиться в поле зрения космонавтов и его действия должны быть предсказуемы и понятны членам экипажа, а также он должен вызывать доверие и желание пообщаться.

Для того, чтобы антропоморфный робот мог приносить наибольшую пользу, он должен уметь работать в нескольких режимах: в интерактивном (под управлением оператором при помощи джойстика, экзоскелета и т.д.) и в автономном (супервизорном) под контролем оператора Центра управления полётом или космонавта.

В целях построения эффективной коммуникации между экипажем и антропоморфным роботом в космосе необходимо провести предварительную работу во время подготовки космонавтов к полету [2]:

– экипаж должен быть подготовлен к такому «общению» (знать его возможности и ограничения, особенности поведения робота и др.);
– подробно изучить индивидуальные особенности членов экипажа (характер, темперамент, интересы, круг общения, семьи др.);
– робот должен «знать» исходные, характерные, индивидуальные особенности поведения (привычки) каждого члена экипажа и обязательно учитывать их в процессе «общения», оценки их текущего состояния и его коррекции;
– составить и использовать индивидуальные программы общения робота с каждым членом экипажа;
– использовать в коммуникативном акте набор различных тем (функциональная музыка, аудиописьма, цветовые и визуальные сюжеты, фотографии, голоса друзей и родных, психорегулирующие упражнения, приятные сюрпризы, что-то из увлечений и др.).

Специалистами Центра подготовки космонавтов им. Ю.А. Гагарина были разработаны критерии необходимости и возможности роботизации полетных операций на пилотируемых космических аппаратах применительно к антропоморфным роботам [3]. Антропоморфного робота рекомендуется использовать в нескольких случаях: когда возникают экстремальные (аварийные) условия, опасные для жизни и здоровья космонавтов; существует угроза выполнению программы полета; появляется потребность выполнить трудоёмкие и монотонные операции, либо операции, требующих большой физической нагрузки, превышающей возможности космонавтов; когда длительность работы в открытом космосе превышает допустимое время пребывания космонавтов в скафандрах.

При этом возможность выполнения полётных операций антропоморфным роботом космического назначения во многом зависит от следующих причин: степени детерминированности полётных операций; конструкции и уровня функциональности антропоморфного робота; его способности к навигации и перемещению во внутреннем объеме орбитальной станции и на ее поверхности; технических характеристик (например, скорости и точности выполнения операций, веса и габаритов перемещаемого оборудования и др.); развиваемых физических усилий, степеней подвижности; наличия соответствующего рабочего инструмента и возможности для его применения антропоморфным роботом.

За счет постоянного совершенствования космической робототехники и при наличии ограниченных возможностей космонавта, можно говорить о том, что в уже ближайшей перспективе космические роботы могут оказаться в некоторых областях деятельности достаточно эффективными. Необходимо также принимать во внимание следующие обстоятельства: космическим роботам не нужны вещи и средства гигиены, разнообразное питание, они не подвержен воздействию эмоций и т.д.

Однако у роботов есть свои недостатки: они могут сломаться, требуют обслуживания, электропитание, им сложно, а порой и невозможно выполнять интеллектуальные и творческие операции, а также работать в слабо детерминированной среде. Возможно, эти недостатки будут исправлены или минимизированы в ближайшие десятилетия, однако на данный момент наиболее эффективным кажется совместный труд космонавта и робота космического назначения [2].

МКС уже посетило 2 модели человекоподобных внутрикорабельных роботов: Kirobo и Robonaut2.

Первым антропоморфным космическим роботом стал американский Робонавт 2, разработанный General Motors по заказу NASA. Робот состоял из торса с головой и руками, который был закреплен на платформе. На Международную космическую станцию робот был доставлен в марте 2011 г., где он находится и сейчас [4]. Его облик в настоящее время изменился – у него появились ноги, они не подобны человеческим, а приспособлены для перемещению по станции. Астронавты проводят его испытания в невесомости.

Японский гуманоидный миниробот Kirobo был доставлен на МКС в августе 2013 г., он сделан таким образом, чтобы размерами и внешним видом напоминать ребенка. Его рост составляет 34 см, ширина плеч - 18 см, толщина - 15 см, вес чуть больше 1 кг. Миниробот снабжен системой распознавания голоса и слов, блоком обработки вопросов и формирования ответов на них, синтезатором речи, видеокамерой для записи изображений, блоком распознавания лиц, возможностью перемещаться в невесомости и ориентироваться на борту корабля. При выборе внешности робота ученые стремились помимо воплощения в облике «детскости», сглаживающей ограниченный интеллект, наивность и простоту речи и поведения, послушность и доверчивость, сделать его похожим на космонавта Коичи Ваката, с которым ему предстояло быть вместе на Международной космической станции. Помимо оказания психологической поддержки робот также выступал в роли связующего звена (коммуникатора) между членами экипажа, между астронавтами и Центром управления полётом, между астронавтами и техническими системами, между астронавтами и своим минироботом-дублером Mirata. 11 февраля 2015 г. Kirobo вернулся на Землю, миссию посчитали успешной, миниробот дважды вошел в книгу рекордов Гиннесса: как первый робот-напарник (компаньон) человека в космосе и как робот, общавшийся с человеком на самой большой высоте – 414,2 км. Конкретные итоги экспедиции пока не разглашаются. В интернете в основном говорится, что робот фотографировал и снимал видео, а также разговаривал с астронавтом на японском языке. В дальнейшем Kirobo будут совершенствовать как в механико-электронном направлении, так и в сторону усиления его интеллекта.

Среди других наиболее успешных мировых разработок выделяются: Валькирия (NASA), SAR 400 и 401 НПО «Андроидная техника», Justin (немецкое космическое агентство DLR) и др. Как правило, эти роботы обладают ограниченным функционалом и служат в большей степени для механической работы. Во второй половине 2014 г. ЦНИИмаш совместно с компанией «Нейроботикс» приступили к разработке робота Андронавта, антропоморфной робототехнической системы (АРТС), который должен будет работать не только в качестве механического помощника (как в автономном режиме, так и в режиме аватара), но также обеспечивать информационную и психологическую поддержку членам экипажа. Задачи, связанные с механической работой остаются стандартными, но все более сложными и интересными становятся задачи в рамках психологической и информационной поддержки, для выполнения которых необходим антропоморфный социальный робот.

Так, для возможности оказания информационной помощи робот будет знать схему космической станции, расположение всех компонентов системы управления, местонахождение грузов, доставляемых на станцию и т.д. и сможет помогать космонавтам находить необходимые им предметы. Андронавт будет снабжен обширными БД для обеспечения членов экипажа всей необходимой информацией и возможностью подключаться к электронным ресурсам в случае необходимости, распознаванием образов, в том числе лиц и эмоций людей, а также голоса и речи, широким спектром развлекательных возможностей за счет технологии чат-бота и очков дополненной реальности.

Очки дополненной реальности позволят передавать космонавтам следующую информацию:

– состояние физических параметров организма при различных нагрузках (в том числе, тренировках);
– инструкции при ремонте и обслуживании сложных узлов;
– стимулирующую информацию (например, в рамках психологической поддержки);
– данные от чат-бота в момент общения;
– конфиденциальную или личную информацию;
– досуговую информацию, например: видео (записи важных событий, семейные хроники, фильмы), игры (частично или полностью виртуальные) и т.д.

Андронавт также может осуществлять общую и личную циклограмму тренировки для поддержания и восстановления профессионального навыка космонавта в условиях длительного пребывания на космической станции. Осуществляться это действие может в автономном режиме с промежуточной оценкой профессиональных знаний. В случае если тестирование прошло с низкой оценкой, Андронавт предлагает пройти курс по восстановлению утраченных знаний.

Важным элементом функционала робота станет выявление отклонений состояния и настроения членов экипажа, базирующееся на анализе и оценке изображений лиц астронавтов. Для этой цели робот оснащается программой лицевой (мимика лица, артикуляция губ, положение головы) идентификации. Предполагается, что используя снимки лиц членов экипажа, обученный робот будет не только распознавать их, но при этом он будет в состоянии определить симптомы напряженности, усталости, раздражения, делать надлежащие выводы и даже вступать в адекватные формы общения. Обычно психологическая поддержка оказывается членам экипажа дистанционно при помощи теле- и радиосвязи, использование для этих целей социального робота позволит членам экипажа выбрать любое удобное время для общения, темы и длительность разговоров, робот может менять свои настройки «темперамента» и «настроения» с учетом разговора с конкретным распознанным им космонавтом, учитывая его предпочтения и сиюминутное эмоциональное состояние, может общаться как вербально, так и невербально. Кроме того, в случае необходимости психологи смогут общаться с космонавтами и через робота в режиме телеприсутствия.

Социальный робот будет выступать в роли: психолога, информатора, персонального тренера, прислуги (уборщика мусора, для подогрева пищи и т.д.), помощника при выполнении рутинной работы, а в случае экстремальных условий, тело Андронавта может быть использовано для выполнения опасных для человека операций.

Особое внимание уделено внешности робота – он должен быть антропоморфным, так как управляется от экзоскелета с копированием кинематики человека, а кроме того, это необходимое условие для полноценной коммуникации Андронавта с человеком, в том числе и на невербальном уровне (движения глаз и мимических мышц).

По поводу допустимой степени антропоморфности часто ведутся дискуссии в научных и около научных кругах. Противники человекоподобной внешности роботов ссылаются на эффект «Зловещей долины». В 1970-х годах японский ученый Масахиро Мори опубликовал статью [1], где предложил график зависимости реакции людей на роботов в соответствии с их внешним подобием с человеком и назвал его «Uncanny valley» (наиболее частотный перевод «Зловещая долина»). В статье не говорится о том какие были проведены исследования и как; автор опирается преимущественно на свое восприятие: протезов, промышленных роботов и человекоподобных игрушек, а также на постулат о том, что большинство вещей в жизни человечества, в том числе и отношение к чему-либо, можно выразить функцией $y = f(x)$.

Масахиро Мори говорит о том, что описанный им эффект возникает из страха смерти, что после определенной степени близости внешнего облика, человек начинает воспринимать объект как себе подобное живое существо с отклонениями, что вызывает: отвращение и ужас (мертвец, зомби и т.п.), и рекомендует дизайнерам не стремиться к ярко выраженному человекоподобию при создании роботов.

Однако нет четкой границы «прекрасного» и «ужасного» в отношении антропоморфных роботов. Так сотрудниками компании «Нейроботикс» не раз замечалось на выставках, что, чем красивее и человекоподобнее робот, тем больший интерес он вызывает, к нему подходят, фотографируются, разговаривают, трогают, в особенности это проявляется у детей и людей пожилого возраста. Было отмечено также, что даже при негативной первоначальной реакции, после диалога с роботом и в ходе общения с человеком, обыгрывающим ситуацию через юмор или объясняющего полезность таких роботов в будущем, отношение меняется в позитивную сторону, а если человек проведет возле робота более 10 минут, то привыкает и уже не обращает внимания на его внешность.

Кроме того, современные куклы-роботы для взрослых достаточно точно повторяют внешность и действия реальных людей, и при этом заметно, что они не настоящие, однако они не подпадают под эффект «Зловещей долины», таким образом, можно предположить, что восприятие антропоморфных роботов зависит не только от их внешности, ситуативного контекста, заинтересованности людей в их работе, но и от личностных особенностей каждого взаимодействующего субъекта и привыкания. Исследования в данной области еще неоднократно будут проводиться, и их результаты позволят робототехникам и промышленным дизайнерам будущего решать стоит ли разрабатывать и производить антропоморфных роботов и для каких целей они будут служить.

В случае Андронавта было решено не фокусироваться на ярко выраженном человекоподобии, как это было сделано компанией «Нейроботикс» в андроидных роботах с портретным сходством (Пушкин, Тьюринг, Алиса и др.), но необходимо было соблюсти наличие базовых частей тела в их соотношении с человеческими (например, расположение и размер глаз, рук, головы и т.д.). Такая задача потребовала в каждом случае из множества возможных вариантов комбинаций выбирать именно тот, который соответствовал бы её заранее определенному решению. Например, при выборе расположения техно-глаз с возможностью обеспечения бинокулярного зрения и необходимых для использования в рамках невербального общения в ходе исследований пришлось отвергнуть варианты с дисплеями, которые могли бы располагаться только выше или ниже камер, и сделать глаза-камеры со светодиодной подсветкой, позволяющей цветом и подсветкой нужной зоны выражать эмоции.

Таким образом, социальные антропоморфные роботы – это перспективное формальное воплощение всех современных технологий, позволяющих роботу взаимодействовать с предметами и ориентироваться в пространстве подобно человеку, а также более эффективно вступать в коммуникацию с членами экипажа и достигать поставленных целей.

1. Mori M. The Uncanny Valley [Электронный ресурс]: http://www.androidscience.com/theuncannyvalley/proceedings2005/uncannyvalley.html, (дата обращения: 9.06.2015)
2. Богачёва Р.А. Супотницкий А.Н. Первые шаги и перспективы развития коммуникации и психологической поддержки космонавтов при помощи социальных роботов // Гуманитарная информатика № 9, 2015. С. 119-127
3. Бурдин Б.В., Михайлюк М.В., Сохин И.Г., Торгашев М.А. Использование виртуальных моделей 3D-моделей для экспериментальной отработки бортовых полетных операций, выполняемых с помощью антропоморфных роботов // Труды 7-го Международного симпозиума «Экстремальная робототехника = робототехника для работы в условия опасной окружающей среды» (Санкт-Петербург). 2-3 октября 2013. С-П.: Политехника-сервис, 2013. С. 221
4. Зильберман Н.Н. Функциональная классификация социальных роботов [Электронный ресурс]. http://www.huminf.tsu.ru/wordpress/wp-content/uploads/zilberman_nn/2014/функциональная-классификацич-социальных-роботов.pdf, (дата обращения: 10.06.2015).

V.M. Lokhin, S.V. Manko, M.P. Romanov

THE IMPROVING OF THE ADAPTIVE PROPERTIES OF AUTONOMOUS ROBOTS BASED ON INTELLIGENT TECHNOLOGIES

MIREA, Moscow, Russia
cpd@mirea.ru

The entire history of artificial intelligence is mainly connected with attempts to develop the most advanced techniques and management tools in the face of uncertainty. At the same time, while controlling autonomous robots or other types of complex dynamic objects [1], it is necessary to overcome the effect of uncertainty on various levels of the hierarchy of management: planning levels of behavior and appropriate action, the level of performance of these activities, information and measurement level. In other words, we have to solve the problems of adaptation in general, at all levels of the management hierarchy; at the same time as the foundation of these solutions is promising to consider the intelligent technologies.

Over the past two decades, the concept of building management systems (MIS) are mainly formed and justified in detail, particularly in [2-4]. It is obvious that the current intelligent technology has become a natural basis, not only to improve the quality of ACS, but also to enhance their adaptive capacities (Fig. 1).

The key provision of the concept is:

– the principle of situational management, according to which each class of situations, the occurrence of which are considered acceptable in the operation of the system is associated with a management solution;
– the principle of hierarchical structure, involving, in general, the presence of a control system of the executive, tactical, strategic and information-measuring levels;
– the use of information Intelligent technologies (expert systems, neural network structures, fuzzy logic, associative memory), and combinations thereof for the implementation of subsystems of different levels of management hierarchy based on modern methods of knowledge processing;
– the introduction of intelligent feedback loop that ensures the formation of new or update existing knowledge in the process of self-study based on the generalization of accumulated experience.

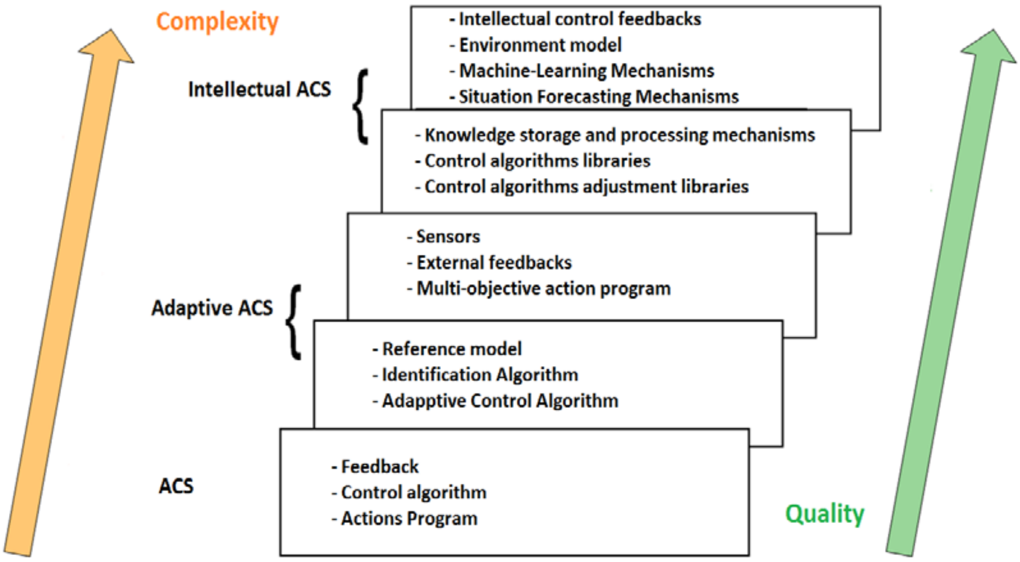


Fig. 1. Development of principles of construction of automatic control systems

The first three principles that underlie the concept of building management systems, until recently quite satisfied most developers of extreme robotics tools. However, as the complexity of created samples and tasks assigned to them the issues of improving the properties of adaptive autonomous robots on the basis of self-study begin to take on a special urgency.

Therefore, it is proposed the fourth additional basic position, suggesting self-organization and characterizes the degree of intelligence of the system (that is, its theoretical properties) adequately reflecting its adaptation properties (as the material possibility of struggling with factors of uncertainty).

The main architectural feature that distinguishes the intelligent automatic control system (IACS) (Fig. 2) from built one on the "traditional" pattern is associated with connection mechanisms of storage and processing of knowledge to perform the required functions specified in incomplete (or uncertain) conditions at the random nature of the external and internal disturbances. In due to perturbations of this kind they may include unforeseen changes in purpose or program management, system performance, and facility management, environmental parameters, etc.

The introduction into the structure of the ACS the units of Knowledge Base (KB) and the inference engine (MLV) and the organization of the corresponding channel tuning control device (RU) (i.e. the the creation of the intellectual loop adaptation) should provide a parry of some uncertainties.

In [4] for the organization of control actions, appropriate to different levels of uncertainty, it was proposed to introduce (by analogy with the gradations of stability in the theory of automatic control) the concepts of a degree of intelligence of small and a large ones, in general. In developing these concepts as applied to problems of adaptive management, it is offered in the block diagram in Fig. 2.to provide the additional intellectual circuit blocks (except for BR and MLV) capable of maintaining a high degree of intelligence and consequently to ensure (if necessary) the high level of adaptation, including the formation the output about program change or management purposes. Similar blocks are "self-learning" and "Forecast" ones.

Using this structure, we can give the following interpretation of the various degrees of intelligence and levels of adaptation:

IACS with a degree of intelligence ‘in a small’ has a layer of the work with the knowledge base and the formation of solutions (the latter is completed by mechanism of logical input - MLI), provides parry of uncertainty and adaptation by changing parameters of RC (Fig. 2) and has the I-th level of adaptation;

IACS with a degree of intelligence ‘in a large’ has the additional self-learning level and can perform not only the update of algorithm, but the program of the system, i.e. work in a wider range of uncertainties and has the II-nd level of adaptation.

IACS with a degree of intelligence generally has, in addition to the two previous ones a layer of prediction of events and carries out not only the setting and modification of the software algorithms (i.e., the adaptation-level II), and if necessary the adjustment control target. Such a system can provide full functionality throughout the range of possible uncertainties and has a Level III-adaptation.

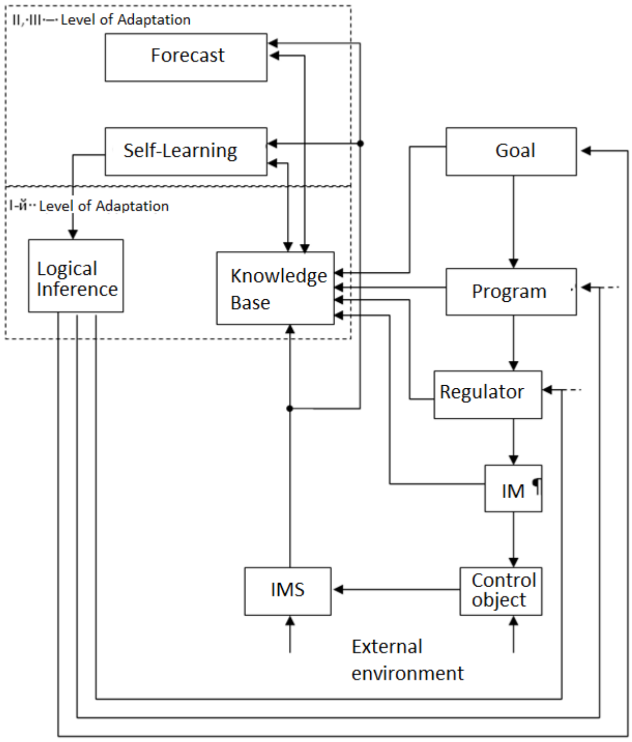


Fig. 2. IACS block diagram

As it can be seen, in addition to the above-noted four basic principles that form the basis IACS we can formulate the fifth one: the higher the level of uncertainty, in which the system works, the higher the degree of intelligence, which determines the required level of adaptation it needs; and the level of adaptation is determined by ACS to operate with the knowledge base, the presence of self-blocks and prediction and appropriate channels of influence on the parameters of the controller, action program or the management objective.

It is obvious enough that knowledge system III-m adaptation level should be higher than the degree of intellectual IACS with ‘a small’ (i.e., I-st level of adaptation).

Naturally, the fifth basic principle (equally as the first four ones) will be developed and improved to the extent that will accrue scientific and practical results in the field of adaptive and intelligent control.

In particular, the accumulation of experience in the organization of self-study and forecasting probably will be able to more clearly priorities, affecting the change management objectives and the corresponding Action Programme.

It is crucial that the proposed approach allows enough at this stage to put specific design problem IACS with different levels of adaptation.

The main purpose of self-organization processes of management systems of autonomous robots is to increase their adaptability to the operating environment uncertain terms.

For example, it is obvious that the intelligent system of an autonomous mobile robot, in general, the gasket must provide optimum route in some sense it purposeful movements. At the same time (depending on the formulation of the problem being solved) map of the area in which the robot operates can be considered known, or be forming directly in the course of its movement to a depth determined by a range of on-board complex data-measuring means. In any of these options, actual permeability of various terrain, depending not only on the nature of the underlying surface and the type of soil, but also from the effects of weather and climate, as well as daily and seasonal factors should be considered as an a priori undetermined parameters significantly influencing the choice of route and formed his marketability.

It should be noted that the performance of evaluation patency of robot on different types of soil can be calculated on the basis of indirect data gathered directly in the course of its movement and connected, for example, with the difference between set and actual speed of the platform.

Simultaneous fixing of visually observed parameters of the environment creates preconditions for attempts to establish regularities between the color characteristics of the underlying surface and estimates the corresponding cross section of the route.

The formation of such knowledge in the process of self-autonomous mobile robot on the basis of an analysis of accumulated data enables operational forecasting and accounting the estimates of some cross areas in the path planning.

A promising approach to self-autonomous robots processes associates with the development of mechanisms for generalization of the acquired experience, which accumulates in the form of implicit in indications of onboard information and measuring tools. Analysis and interpretation are accumulated in the memory array of sensory data could provide the identification of significant patterns of both the effectiveness of the actions of the robot, and the nature of his work environment.

In this context, methods of data mining (Data Mining) [5, 6], using inductive learning paradigm and being of wide application in such application areas as pattern recognition, medical diagnostics, economic forecasting, etc., are extremely in use for solving the problems of formation new knowledge as part of management systems of autonomous robots.

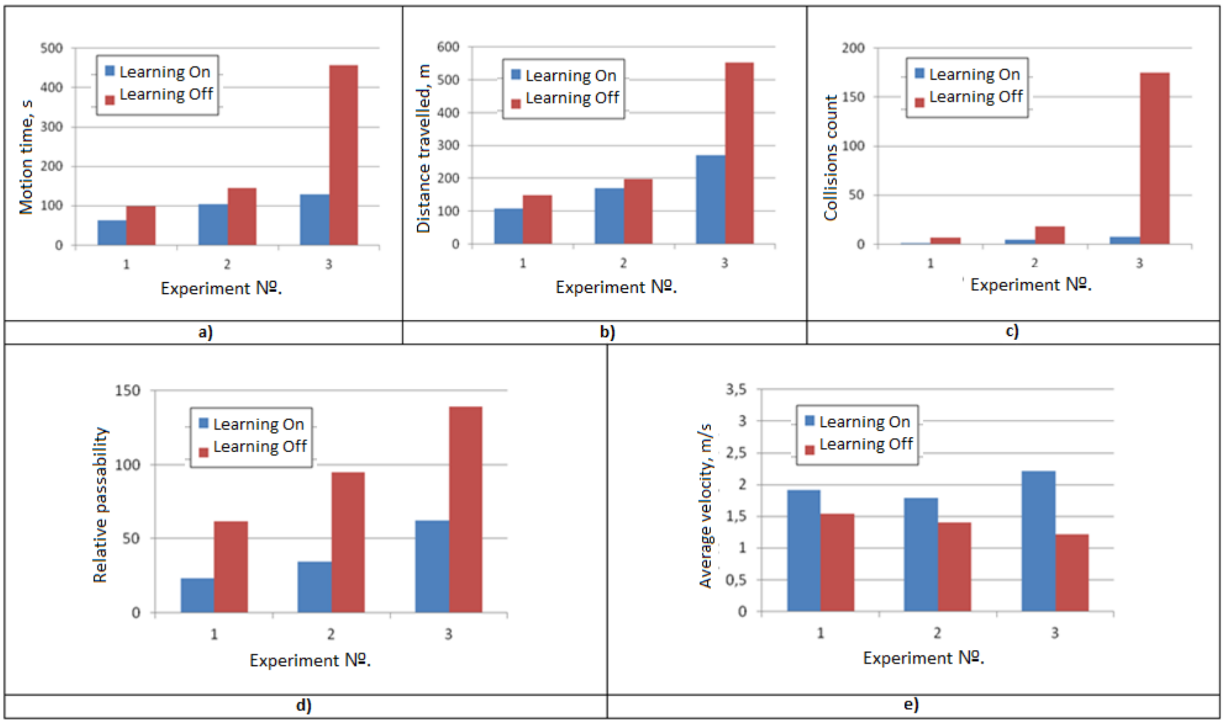


Fig. 3. Experimental evaluation of the effectiveness of tools for self-adaptation of autonomous mobile robot to a priori uncertain terrain characteristics of the operational environment

As shown by the study authors [7], an effective tool for the withdrawal of new knowledge in the processing of large volumes of disparate data is a method for constructing classification trees (decision trees), based on a plurality of sequential separation of existing examples on the basis of information gain.

The conducted simulation experiments fully confirmed the possibility and expediency of the mechanisms of intellectual self-loop feedback control system of an autonomous mobile robot. As can be seen from Fig. 3, performance efficiency of the autonomous mobile robot motion to the target point (such as time and speed, length of passed route considering obstacle avoidance, etc.) by improving adaptation based on self-managed was significantly improved.

The particular relevance of the questions of self-study is becoming in due to self-autonomous robots that operating in conditions of uncertainty in the composition of multi-agent groups. In this case, autonomous agents that ensure the implementation of a common application tasks could implement a mutual exchange of knowledge generated independently of each other.

The practical implementation of the proposed approach to the creation of intelligent control systems of autonomous mobile robots with self-learning based on the formation of classification trees suggests the need for fundamental research on a range of critical issues, foremost among which are:

– rational organization of databases for storing sensory information accumulated as a part of intelligent self-learning management systems;
– mechanisms for constructing associative memory to form generalized images build mechanisms of associative memory to form generalized images of the observed objects, situations and phenomena in an integrated application of technology of neural structures;
– appropriateness of the criteria for generalized operation of intelligent systems.

However, the tasks are undoubted relevance and interest from the standpoint of the principles of building intelligent self-learning systems for information processing and management of autonomous robots and other types of automated devices with enhanced abilities to adapt to a variety of uncertainties of the external environment on the basis of different methods and approaches to the development of knowledge.

1. Intellektualnyeroboty. Pod red. Yurevicha E.I.-M.: Mashinostroenie, 2007
2. I.M.Makarov, V.M.Lokhin, S.V.Manko, M.P.Romanov. Artificial Intelligence and Complex Objects Control. The Edwin Mellen Press. Lewiston, NY, 2000
3. Makarov I.M., Lokhin V.M., Manko S.V., Romanov M.P. Iskusstvennyiintellektiintellektualnyesistemyupravleniia. - M.: Nauka, 2006
4. Makarov I.M., Lokhin V.M., Manko S.V., Romanov M.P. Avtomatizatciiasintezaiobuchenieintellektualnykhsistemupravleniiaiu. - M.: Nauka, 2009
5. LiorRokach, OdedMaimon. Data mining with decision trees: theory and applications. – World Scientific Pub Co Inc., 2008.
6. XindongWu, Vipin Kumar, J. Ross Quinlan, Joydeep Ghosh, Qiang Yang, Hiroshi Motoda, Geoffrey J. McLachlan, Angus Ng, Bing Liu, Philip S. Yu, Zhi-Hua Zhou, Michael Steinbach, David J. Hand, Dan Steinberg. Top 10 algorithmsindatamining / Knowl. Inf. Syst - 2008 – 14(1) – p. 1-37
7. V.M. Lokhin, S.V. Manko, R.I. Alexanderova, S.A.K. Diane, A.S. Panin. Mehanizmyintellektualnykhobratnykhsviazei, obrabotkiznaniiisamoobucheniia v sistemakhupravleniiaavtonomnymirobotamiimultiagentnymirobototekhnicheskimigruppirovkami / Mehatronika, avtomatizatciia, upravlenie №9, 2015.

В.М. Лохин, С.В. Манько, М.П. Романов

ПОВЫШЕНИЕ АДАПТИВНЫХ СВОЙСТВ АВТОНОМНЫХ РОБОТОВ НА БАЗЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

МИРЭА, Москва
cpd@mirea.ru

Вся история развития искусственного интеллекта связана в основном с попытками разработки наиболее совершенных методов и средств управления в условиях неопределенности. При этом, управляя автономными роботами или другими типами сложных динамических объектов [1], .приходится преодолевать влияние факторов неопределенности на различных уровнях иерархии управления: уровнях планирования поведения и целесообразных действий, уровне исполнения этих действий, информационно-измерительном уровне. Иными словами, приходится решать задачи адаптации в общем случае на всех уровнях иерархии управления; при этом в качестве основы этих решений перспективно рассмотрение интеллектуальных технологий.

За последние два десятилетия концепция построения интеллектуальных систем управления (ИСУ) в основном сформировалась и достаточно подробно обоснована, в частности, в работах [2-4]. Очевидно, что в настоящее время интеллектуальные технологии стали естественной основой не только для повышения качества САУ, но и для расширения их адаптационных возможностей (Рис. 1).

Ключевым положением концепции является:

– *принцип ситуационного управления*, в соответствии с которым каждому классу ситуаций, возникновение которых считаются допустимым в процессе функционирования системы, ставится в соответствие некоторое решение по управлению;
– *принцип иерархического построения*, предполагающий в общем случае наличие в системе управления исполнительного, тактического, стратегического и информационно-измерительного уровней;
– использование информационных интеллектуальных технологий (экспертных систем, нейросетевых структур, нечеткой логики, ассоциативной памяти) и их комбинаций для реализации подсистем различных уровней иерархии управления на основе современных методов обработки знаний;
– введение контура интеллектуальной обратной связи, обеспечивающего формирование новых или уточнение имеющихся знаний в процессе самообучения на основе обобщния накапливаемого опыта.

Рис. 1. Развитие принципов построения систем автоматического управления

Первые три принципа, составляющие основу концепции построения интеллектуальных систем управления, до недавнего времени вполне удовлетворяли большинство разработчиков средств экстремальной робототехники. Однако по мере усложнения создаваемых образцов и возлагаемых на них задач вопросы повышения адаптивных свойств автономных роботов на основе самообучения начинают приобретать особую актуальность.

Поэтому и предлагается дополнительное четвертое базовое положение, предполагающее организацию самообучения и характеризующее степень интеллектуальности системы (т.е. ее теоретическое свойство), адекватно отражающее ее адаптационные свойства (как материальную возможность системы по борьбе с факторами неопределенности).

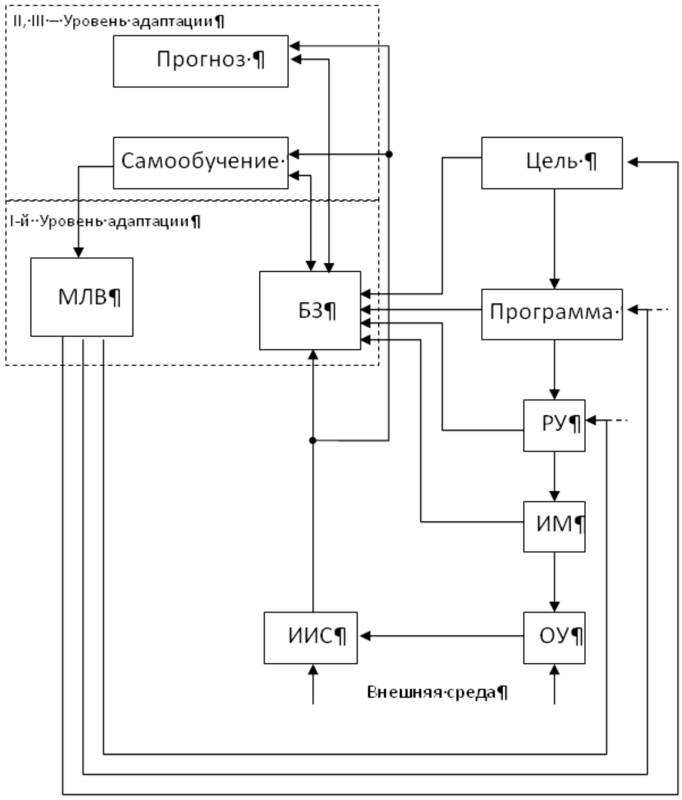


Рис. 2. Обобщенная схема ИСАУ

Главная архитектурная особенность, которая отличает интеллектуальную систему автоматического управления (ИСАУ) (Рис. 2) от построенной по «традиционной» схеме, связана с подключением механизмов хранения и обработки знаний для выполнения требуемых функций в неполнозаданных (или неопределенных) условиях при случайном характере внешних и внутренних возмущений. К возмущениям подобного рода могут относиться непредусмотренное изменение цели или программы управления, эксплуатационных характеристик системы и объекта управления, параметров внешней среды и т.д.

Введение в структуру САУ блоков базы знаний (БЗ) и механизма логического вывода (МЛВ) и организация соответствующего канала подстройки регулирующего устройства (РУ) (т.е. создание интеллектуального контура адаптации) должно обеспечить парирование некоторых факторов неопределенности.

В работе [4] для организации управляющих воздействий, адекватных различным уровням неопределенности, было предложено ввести (по аналогии с градациями устойчивости в теории автоматического управления) понятия степени интеллектуальности в малом, в большом, в целом. Развивая данные понятия применительно к задачам адаптивного управления, предлагается в структурной схеме рис. 2. предусмотреть в интеллектуальном контуре дополнительные блоки (кроме БЗ и МЛВ), способные поддерживать высокую степень интеллектуальности и соответственно обеспечить (при необходимости) высокий уровень адаптации, включая формирование вывода об изменении программы или цели управления. В качестве таких блоков на рис. 2. приведены блоки «самообучение» и «прогноз».

Пользуясь такой структурой, можно дать следующее толкование различным степеням интеллектуальности и уровням адаптации:

ИСАУ *со степенью интеллектуальности в малом* имеет слой работы с базой знаний и формирования решений (последний реализуется механизмом логического вывода – *МЛВ*), осуществляет парирование неопределенности и адаптацию за счет изменения параметров РУ (рис. 2) и имеет I-й уровень адаптации;

ИСАУ *со степенью интеллектуальности в большом* имеет дополнительно слой самообучения и может осуществлять изменение не только алгоритма, но и программы работы системы, т.е. работать в большем диапазоне неопределенностей и имеет II-й уровень адаптации;

ИСАУ *со степенью интеллектуальности в целом* имеет дополнительно к двум предыдущим слой прогноза событий и осуществляет не только настройку алгоритмов и модификацию программ (т.е. адаптацию II –го уровня), но и при необходимости корректировку цели управления. Такая система способна обеспечить полную работоспособность во всем диапазоне возможных неопределенностей и имеет III-й уровень адаптации.

Как видно, в дополнение к отмеченным выше четырем базовым принципам, составляющим основу ИСАУ, можно сформулировать пятый:

чем выше уровень неопределенности, в котором функционирует система, тем выше должна быть степень ее интеллектуальности, определяющая требуемый уровень адаптации; при этом уровень адаптации САУ определяется возможностью работы с базой знаний, наличием блоков самообучения и прогноза и соответствующих каналов воздействия на параметры регулятора, программу действий или цель управления.

Достаточно очевидно, что уровень знаний системы с III-м уровнем адаптации должен быть выше, чем у ИСАУ со степенью интеллектуальности в малом (т.е. с I-м уровнем адаптации).

Естественно, что пятый базовый принцип (в равной степени как и первые четыре) будет развиваться и совершенствоваться по мере того, как будут накапливаться научные и практические результаты в области адаптивного и интеллектуального управления. В частности, по мере накопления опыта в организации самообучения и прогноза, вероятно, удастся более четко расставить приоритеты, влияющие на изменение цели управления и соответствующей программы действий.

Принципиально важно, что предлагаемый подход позволяет на данном этапе достаточно конкретно ставить задачи проектирования ИСАУ с различным уровнем адаптации.

Главной целью организации процессов самообучения интеллектуальных систем управления автономными роботами является повышение уровня их адаптивности к неопределенным условиям среды функционирования.

Так, например, очевидно, что интеллектуальная система управления автономного мобильного робота в общем случае должна обеспечивать прокладку оптимального в некотором смысле маршрута его целенаправленного перемещения. При этом (в зависимости от постановки решаемой задачи) карта местности, в которой функционирует робот, может считаться известной или формироваться непосредственно в процессе его движения на глубину, определяемую дальностью действия бортового комплекса информационно-измерительных средств. В любом из этих вариантов, фактические показатели проходимости тех или иных участков местности, зависящие не только от характера подстилающей поверхности и типа грунта, но и от воздействия погодных и климатических, а также суточных и сезонных факторов, необходимо рассматривать в качестве априорно неопределенных параметров, существенно влияющих на выбор формируемого маршрута и его реализуемость.

Следует отметить, что оценки характеристик проходимости робота на различных типах грунтов могут вычисляться на основе косвенных данных, собираемых непосредственно по ходу его движения и связанных, например, с различием задаваемой и фактической скорости движения платформы.

Одновременная фиксация визуально наблюдаемых параметров окружающей обстановки создает предпосылки для попыток установления закономерностей между цветовыми характеристиками подстилающей поверхности и оценками проходимости соответствующего участка маршрута.

Формирование подобных знаний в процессе самообучения автономного мобильного робота на основе анализа накапливаемых данных, позволяет обеспечить оперативное прогнозирование и учет оценок проходимости отдельных участков местности при планировании маршрута движения.

Перспективный подход к организации процессов самообучения автономных роботов связан с развитием механизмов обобщения приобретаемого опыта, который в неявной форме аккумулируется в показаниях бортовых информационно-измерительных средств. Анализ и интерпретация накапливаемых в памяти массивов сенсорных данных могли бы обеспечить выявление значимых закономерностей как об эффективности действий самого робота, так и о характере его рабочей среды. В этой связи методы глубинного анализа данных (*DataMining*) [5, 6], использующие парадигму индуктивного обучения и нашедшие широкое применение в таких прикладных сферах, как распознавание образов, медицинская диагностика, экономическое прогнозирование и пр., представляют крайний интерес для решения задач формирования новых знаний в составе интеллектуальных систем управления автономными роботами.

Как показали исследования авторов [7], эффективным инструментом вывода новых знаний при обработке больших массивов разнородных данных является метод построения деревьев классификации (деревьев принятия решений), основанный на последовательном разделении множества имеющихся примеров по принципу прироста информации.

Проведенные модельные эксперименты полностью подтверждают возможность и целесообразность реализации механизмов самообучения в контуре интеллектуальной обратной связи системы управления автономным мобильным роботом. Как видно из рис. 3, показатели эффективности функционирования автономного мобильного робота при движении в целевую точку (такие как время и скорость движения, протяженность пройденного маршрута с учетом обхода препятствий и т.д.) за счет повышения уровня адаптации на основе самообучения удалось существенно улучшить.

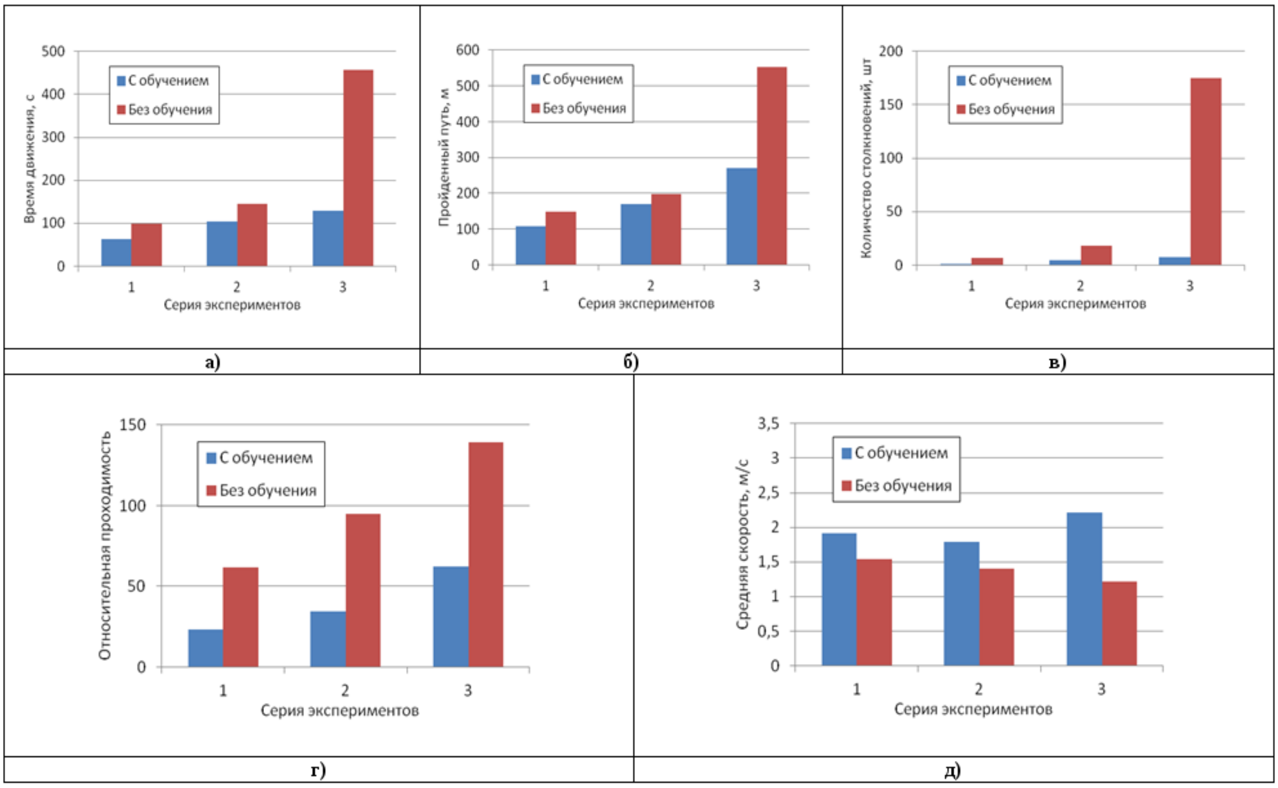


Рис. 3. Экспериментальные оценки эффективности применения средств самообучения для адаптации автонмного мобильного робота к априорно неоапределенным характеристикам проходимости среды функционирования

Особую актуальность вопросы самообучения приобретают для автономных роботов, действующих в условиях неопределенности в составе многоагентных группировок. В этом случае автономные агенты, обеспечивающие выполнение общей прикладной задачи, могли бы осуществлять взаимный обмен знаниями, накапливаемыми независимо друг от друга.

Практическая реализация предложенного подхода к созданию интеллектуальных систем управления автономными мобильнымит роботами с самообучением на базе формирования деревьев классификации предполагает необходимость фундаментальных исследований по целому ряду принципиально важных вопросов, главными из которых являются:

– рациональная организация баз данных для хранения накапливаемой сенсорной информации в составе интеллектуальных самообучающихся систем управления;
– механизмы построения ассоциативной памяти для формирования обобщенных образов наблюдаемых объектов, ситуацийи и явлений на основе комплексного применения технологии нейросетевых структур;
– обобщенные критерии целесообразности функционирования интеллектуальных систем.

Вместе с тем, поставленные задачи представляют несомненную актуальность и интерес с позиций развития принципов построения интеллектуальных самообучающихся систем обработки информации и управленияавтономными роботами и другими видами автоматических устройств с расширенными способностями по адаптации к многообразию факторов неопределенности внешней среды на основе различных методов и подходов к формированию знаний.

1. Интеллектуальные роботы. Под ред. Юревича Е.И.-М.: Машиностроение, 2007
2. I.M.Makarov, V.M.Lokhin, S.V.Manko, M.P.Romanov. Artificial Intelligence and Complex Objects Control. The Edwin Mellen Press. Lewiston, NY, 2000
3. Макаров И.М., Лохин В.М., Манько С.В., Романов М.П. Искусственный интеллект и интеллектуальные системы управления. - М.: Наука, 2006
4. Макаров И.М., Лохин В.М., Манько С.В., Романов М.П. Автоматизация синтеза и обучение интеллектуальных систем управленияю. - М.: Наука, 2009
5. Lior Rokach, Oded Maimon. Data mining with decision trees: theory and applications. – World Scientific Pub Co Inc., 2008.
6. XindongWu, VipinKumar, J. RossQuinlan, JoydeepGhosh, QiangYang, HiroshiMotoda, GeoffreyJ. McLachlan, AngusNg, BingLiu, PhilipS. Yu, Zhi-HuaZhou, MichaelSteinbach, DavidJ. Hand, DanSteinberg. Top 10 algorithmsindatamining / Knowl. Inf. Syst - 2008 – 14(1) – p. 1-37
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 №9, 2015.

V.P. Andreev, K.B. Kirsanov, Yu.V. Poduraev

GEOGRAPHICALLY DISTRIBUTED “MULTI-OPERATOR” CONTROL OF ROBOTIZED SYSTEMS USING NETWORK TECHNOLOGIES*

Moscow State University of Technology “STANKIN”, International Laboratory “Sensorika”,
Russian State University for the Humanities, Moscow, Russia
andreevvipa@yandex.ru, kkirsanov@gmail.com, poduraev@mail.ru

A technology of supervisory control of robotized systems via the Internet has been developed. We consider a hierarchical structure of the controlof a group of mechatronic devices by the example of mobile robotic systems through the unification of their information–measuring and control systems into a local area network with mobile nodes. A unified approach to the organizationa full-function access via the Internetto specific robotized devices of different models and manufacturers is proposed. We describe the technical implementation of the pilot project forthe hardware and software system by the example of supervisory (via the Internet) control of *AMUR* (IL “Sensorika”) and *Robotino* (Festo) educational robots with a videosurveillance of command execution.

Keywords: mobile robot, supervisory control, spatially distributed control, mechatronic device, robotic system, local area network, network technologies.

Introduction

At present, there have been a large number of application software and system software designed for arranging control of heterogeneous mechatronic devices. The most significant frameworks are

* This study was partially supported by the Russian Foundation for Basic Research, project nos.13 07 01032 and 13-07-00988.

RoboticsOperatingSystem (ROS) and MicrosoftRoboticsDeveloperStudio (MRDS) as well as their predecessors:PalyerProject, LAAS GenoM, and URBI (see Wikipedia). These software systems can efficiently solve the task but merely within a single territory (laboratory, production unit, plant); i.e., they do not solve the problem of spatially distributed control. Consequently, these software systems have no mechanisms of control (via the Internet)of a group of mechatronic devices with a visual feedback to monitor the execution of commands and control programs, which is particularly critical in supervisory control systems. The peculiarity of this method of control is to organize the transfer via Internet multistream video and command/programs of control taking into account network latency and non-guaranteed delivery times of packets.

The task becomes complicated for mobile robotics, when the communication channel comprises a radio channel; this raises the problem of ensuring the system stability to disruption of communication. It is also necessary to ensure a high performance in the transmission of both long (for example, multistream video) and short messages.The mentioned softwaredoes not solve this problem. In a geographically distributed system,when control of "foreign" mechatronic devices is permitted, it becomesextremely important to have a mechanism of the distribution of access rights;this mechanismis missing in ROS and MRDS.

A similar project was accomplished in 2009–2011 in the Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics (RTC) and the Rocket and Space Corporation *Energia* (Russia), jointly with the Institute of Robotics and Mechatronics of the German Aerospace Center (DRL-RMC). The project investigated the possibility of using the Internet for controllingfrom the Earth a *ROBOTIC* two-link robot mounted on the outer surface of the Russian segment of the International Space Station (ISS). The communication sessions with the ISS were provided from both DRL-RMC (Germany) and RTC (St. Petersburg, Russia) throughDRL-RMC using the Internet for the communication between RTC and DRL-RMC. The project had the specific feature that a human–machine interface with torque/force feedback is used. This project considered only the influence of delays in communication channels on the process of control [1, 2].

Below, we consider the problem of geographicallydistributed control(via the Internet)of a united group of robotic systems consisting of mobile robots of different models and manufacturers.

Geographically distributed control of a group of mobile robots

Digital representation of data in the *information–measuring and control system* (IMCS) of a mobile robotic systemmakes it possible to combine its electronic and mechatronic units into a local area network (LAN) with mobile nodes [3, 4]. This method of combination allows the network features to be extendedto the structure of the IMCSof both an individual robotic systemand several robotic systems on the basis of network technologies. In our case, themost importantfeaturesare *reconfigurability* and *scalability*. These features imply thatone can easily extend or modify any resources of the robotic system (sensors, calculators, microprocessors, radio channel generators, and other IP-systems)and specifically combine the IMCSs of multiple mobile robotic systems into interconnected geographicallydistributed system. The use of network technologies makes it possible to arrangea geographicallydistributed "multi-operator" control of a group of mobile robotic systems. The term "multi-operator" means that individual robotic devices involved in the group can be controlled by operators located in different territories. Under certain conditions, this control allows for the one-to-many mode, i.e., if granted with theappropriate right, one operatorcan interfere into the operation of electronic and mechatronicdevices in any robotic systems involved in the group (including dynamic reprogramming of computing devices). An example of this structure for controllinga group of mobile robots (MRs) is shown in Fig. 1.

The communication system designed for control (via the Internet and radio channels) of a group of mobile mechatronic devices must have the following properties:

- provide both "direct" (from onboard TV-cameras) and "alien" (external view from the MR operational range) visual feedback for remote monitoring over the execution of commands and control programs;
- be stable to disruption of communication;
- provide high performance in the transmission of both long and short messages.

We consider the hardware and software solutions ensuring these properties.

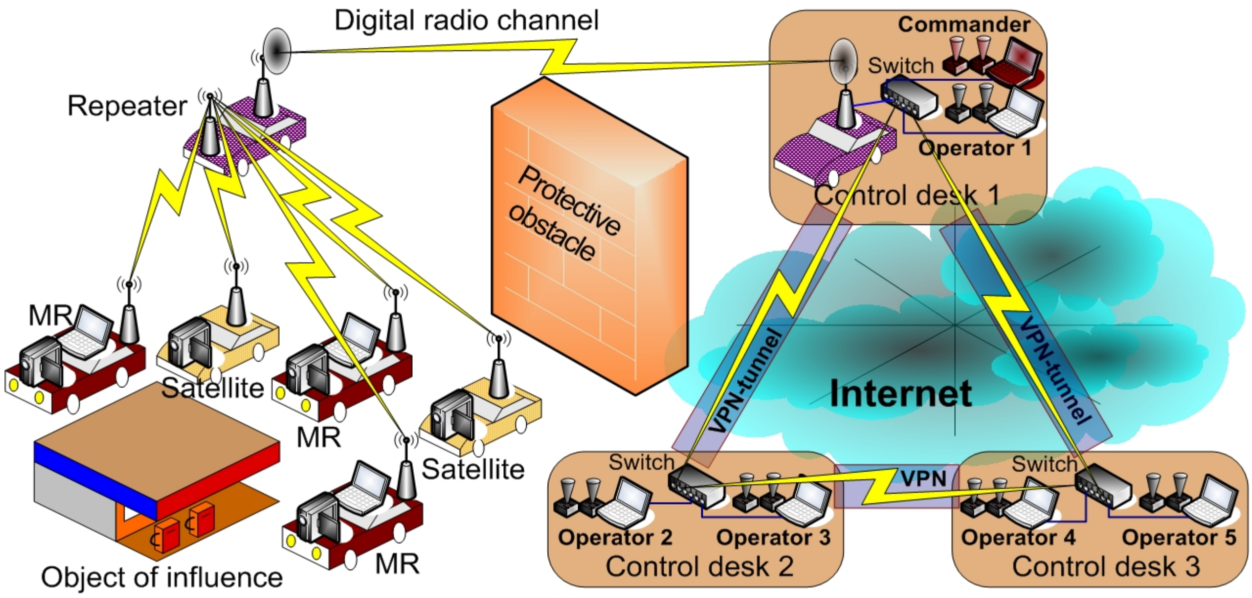


Fig. 1. Geographicallydistributed “multi-operator” control of a group of mobile robots

The main requirements for a multi-component robotic system are as follows [5]:

– the electronic and mechatronic components of the IMCS of the robotic system must be elements of a local area network with mobile nodes;
– thecommunication between mobile and stationary units of the robotic system must be arranged through digital radio channels (Wi-Fi, Wi-Max, etc.);
– the radio channel range should be increased and its quality should be improved through the construction of an optimal operational remotely controlled architecture of the distributed IMCS;
– it is necessary to use a multi-camera system of technical vision: multiple cameras (including those with the PTZ (pan-tilt-zoom)functionality) onboard the mobile unit of the robotic system and cameras on remote Sputnik-devices (stationary or mounted on mobile platforms);
– video signals and signals from other sensors must be preprocessed in a stand-alone mode onboard the mobile unit of the robotic system (digitization, noise filtering, error correction, image compression, etc.);
– operational remote monitoring (with a control desk) of the power system and the radio channel quality is mandatory;
– the remote control desk of the operator must provide:
  - continuous (with a standard frame rate) display of video streams from all TV-cameras as raster images;
  - mnemonic display (on the monitors)of indications of other sensors and the state of controlled parameters (including audio alarm at critical values);
  - possibility of remote control of TV-camera functions (such as PTZ) and LAN settings (for example, the choice of an algorithm for the compression of images or its parameters);
  - possibility of remote monitoring of the program code execution on the onboard computer and its dynamical correction without rebooting the system;
– the communication channels (both the Internet and radio channels) must be protected from unauthorized access (for example, by using VPN-tunnel).

A structure that satisfies the above-mentioned requirements was implemented as a specialized software and hardware system designed for supervisory control of a group of educational mobile robots. The networking mechanism developed by us was used to organize full-function access (via the Internet) to mechatronic devices of different types. This mechanism is based on the concept of "drivers".

The concept of “drivers”

Minimal control object in the proposed structure is any electronic or mechatronic device, such as an onboard computer, a microcontroller, a sensor, a manipulator, or another actuator. Therefore, a key problem in this case was to develop a unified system of software construction rules for specific models of robotic devices, allowing mechatronic components to be included into the LAN without remodeling their low-level code. In other words, it was required to develop a finite set of program instructions of control and network protocols for building an application programming interface (API). This interface must provide a transparent integration of the elements of the mechatronic device and its software into the information space of the global IMCS.

We implement this API on the basis of the concept of "drivers": for each mechatronic device, a unified network control protocol must be builton the base of existing low-level APIs. Then, the manufacturer of mechatronic devices can relatively easily integrate its own device into the network by constructing only an additional driver that implements the protocol-induced program instructions of control and the networking protocols. When a new mechatronic device appears in the network, the software of the control subsystem automatically adds this device into the shared network during the interaction with the driver. Simultaneously, the available mechatronic devices and their descriptions are written into the general catalog of technical specifications.

Implementation

The hardware and software system was implemented with the following properties:

– *universality*: integration of robotic and other mechatronic systems of different models and manufacturers into the system;
– *network reliability*: guaranteed delivery of packets between control interfaces of the system at all networking levels;
– *integrity*: a mechanism of control for access rights and delineation of privileges between users;
– *flexibility and scalability*: decentralized control of the network structure, its on-lineconfigurability;
– *security*: protection from unauthorized access to control interfaces.

The data exchange between the distributed IMCSelements was arranged on the basis of well-known network technologies and solutions with synchronous and asynchronous interaction based on the TCP\IP protocol stack. It contains the following components:

– protocols of synchronous and asynchronous messaging;
– unified directory of services;
– program unit of operator.

According to the classification of the well-known OSImodel, the interaction in our case occurs at the application level, which can be conditionally divided into two sublevels: *transport* and *logical*.

The *transport* sublevel should meet the following requirements:

– high performance in the transmission of both long (for example, multi-stream video; megabytes) and short (for example, control commands; bytes) messages;
– stability to connection breaks (for example, because of the unstable operation of the radio channel);
– possibility of arranging a one-to-many interaction, which is necessary for group control.

The *logical* sublevel should meet the following requirements:

– be cross-platform and multilingual: the possibility of working on different operating systems (Windows, Linux x86\64\arm, Android, MCST Elbrus) and in different languages (C, Java, Python, Fortran);
– human-readability: capability to perceive the information received without using special-purpose program tools(this is achieved by data transmission in a textual format, except for cases when this is critical to the performance; for example, in the case of videostream transmission);
– the possibility of isolated operation: the performance of interacting mechatronic devices involved in a LAN of a given hierarchy level should not be violated when these devices are disconnected from a higher level network that is external to them;
– decentralization and capacity for self-organization: there is no need for the existence of a "central" server regulating the operation of all components of the system, except in cases when the access rights are restricted and users are registered.

The exchange of messages was based on the ZeroMQ library, over which a model of *actors*is implemented [6]. This mechanism provides message scheduling and makes it possible to arrange a remote dynamic (i.e.,without stopping the operation) change in the executable code on the onboard computer. A more detailed description of this approach can be found in [7]. The software developed fully meets the above-mentioned requirements. An additional advantage is the use of the library under GNU LGPL V3 license; i.e.,this library is free software.

Conclusion

The proposed structure of geographically distributed control (via the Internet)of a group of mobile robotized devices was implemented as a hardware and software system and proved its efficiency for creating operational channels of multi-operator control of *AMUR* (Autonomous Educational Mobile Robot, IL

“Sensorika”) and *Robotino* (Festoconcern, Germany)type educational robots. These VPN-tunnels are currently operating between the MSTU STANKIN (Moscow) and the Center for Technological Support of Education of the International Institute of New Educational Technologies (CTSE IINET) of RSUH (Moscow). A similar communication channel also exists between the Keldysh Institute of Applied Mathematics, Russian Academy of Sciences (Moscow), CTSE IINET RSUH, and the Far East Federal University (Vladivostok).

This geographically distributed network structure of IMCS ensures that the multidisciplinary experts (including representatives of manufacturers) that are far from the place of activities can be simply engaged in the mobile robot control.

This information and communication infrastructure can be used in the system of distance education [5, 8, 9] for arranging student access to real mechatronic systems located at remote areas (specifically, for connecting branches to laboratory facilities of the main educational institution). This makes it possible to concentrate the technical resources in one place and organize the education of student groups remotely (from branches) without reducing the education quality. In addition, this structure allows geographically dispersed research teams to be combined around an entity that has appropriate facilities and resources, or mechatronic devices of different groups to be combined into a single system with any-to-any access.

1. Jordi Artigas, RyuJee-Hwan, C.Preusche and G.Hirzinger. Network representation and passivity of delayed teleoperation systems. Intelligent Robots and Systems (IROS), 2011 IEEE/RSJ International Conference on 25–30 Sept. 2011, pp.177–183.
2. Guk M.Yu. Kontur-2: AjointRussian–Germanspace experiment on torque/force controlof ground-based robots onboard the International Space Station / Guk M.Yu., SilinenkoA.V. // Extreme Robotics. Proceedings of the International Scientific-Technical Conference. – St. Petersburg: Politekhnika-servis, 2014. – P.59–64.
3. Andreev V.P.Networktechnologiesformobilerobotsinextremeenvironments / Andreev V.P., Pryanichnikov V.E. // Extreme Robotics. Proceedings of the All-Russian Scientific-Technical Conference. – St. Petersburg: Politekhnika-servis, 2012. – P.462–472.
4. Pryanichnikov V.E. The Application of Network Technologies to Constructing Group Controlled Systems with Machine Vision for Mobile Robots / Pryanichnikov V.E., Andreev V.P. // Annals of DAAAM for 2012& Proceedings of the 23th international DAAAM Symposium "Intelligent Manufacturing & Automation" 24–27 October 2012,Zadar, Croatia, ISSN 2304-1382, 2012. – V.23, No.1. – P.1167–1174.
5. Andreev V.P., Educational and scientific virtual spatially-distributedrobotics laboratory / Andreev V.P., Kirsanov K.B., PryanichnikovV.E. // Extreme Robotics. Proceedings of the International Scientific-Technical Conference. – St. Petersburg: Politekhnika-servis, 2014. – P.234–239.
6. Carl Hewitt, et al. Actor Induction and Meta-evaluation Conference Record of ACM Symposium on Principles of Programming Languages, January 1974.
7. Andreev V.P.Construction anauto-configurable network of mechatronic devices for problems of geographically-distributed control / Andreev V.P., KirsanovK.B.,PletenevP.F. // Extreme Robotics. Proceedings of the International Scientific-Technical Conference. – St. Petersburg, October 8–9, 2015.
8. KuvshinovS.V. IT-technologiesforcreatinga creativeeducational environment / KuvshinovS.V., PoduraevYu.V., PryanichnikovV.E. // Information-measuring and control systems. – Moscow: Radiotekhnika, 2013. – Vol.11, No. 4. – P.93–96.
9. Education on the basis of virtual learning robotics laboratory and group-controlled robots / Andreev V., Pryanichnikov V.,Poduraev Y.,KuvshinovS. // 24th DAAAM Int. Symp., 2013. Procedia Engineering, 2014. – V.69. – P.35 – 40.

В.П. Андреев, К.Б. Кирсанов, Ю.В. Подураев

ТЕРРИТОРИАЛЬНО-РАСПРЕДЕЛЕННОЕ МНОГООПЕРАТОРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ РОБОТИЗИРОВАННЫМИ СИСТЕМАМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СЕТЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ*

МГТУ «СТАНКИН», МЛ «Сенсорика», МИНОТ РГГУ, Москва,
andreevvipa@yandex.ru, *kkirsanov@gmail.com*, *poduraev@mail.ru*

Приведены результаты исследований по созданию технологии супервизорного управления роботизированными системами через Интернет. Рассмотрена иерархическая структура организации управления группой мехатронных устройств на примере мобильных робототехнических систем через объединение их информационно-измерительных и управляющих систем в локальную вычислительную

* Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ: гранты 13-07-01032, 13-07-00988

сеть с мобильными узлами. Предложен единый подход к организации полнофункционального доступа через Интернет к конкретным роботизированным устройствам различных моделей и производителей. Описана техническая реализация пилотного проекта программно-аппаратного комплекса на примере супервизорного управления через Интернет учебными роботами АМУР (МЛ «Сенсорика») и Robotino (Festo) с организацией видеоконтроля исполнения команд.

Ключевые слова: мобильный робот, супервизорное управление, территориально-распределённое управление, мехатронное устройство, робототехнический комплекс, локальная вычислительная сеть, сетевые технологии.

Введение

На сегодняшний день существует большое количество прикладного и системного программного обеспечения (ПО), предназначенного для организации управления разнородными мехатронными устройствами. Из наиболее значимых программных каркасов (framework) можно выделить RoboticsOperatingSystem (ROS) и MicrosoftRoboticsDeveloperStudio (MRDS), а также их предшественников – PalyerProject, LAAS GenoM и URBI(см. Wikipedia). Эти комплекты ПО эффективно решают поставленную задачу, но лишь в рамках одной территории – лаборатории, цеха, завода; т.е., они не решают задачу территориально-распределённого управления. Вследствие этого в них отсутствует механизм организации управления через Интернет группой мехатронных устройств с визуальной обратной связью для наблюдения за исполнением команд/программ управления, что особенно критично в системах дистанционного и супервизорного управления. Особенность такого способа управления заключается в организации передачи по каналам Интернет многопотокового видео и, одновременно, команд/программ управления с учётом задержек в сети и с негарантированным временем доставки пакетов. Задача усложняется в случае мобильной робототехники, когда коммуникационный каналвключает в себя радиоканал; при этом возникает проблема обеспечения устойчивости системы к нарушениям связи и обеспечения высокой производительности при передаче как длинных сообщений, например, многопотоковое видео, так и коротких. В упомянутом ПО данная проблема не решается. В территориально-распределённой системе, когда допускается управление «чужими» мехатронными устройствами, крайне важным становится наличие механизма распределения прав доступа, что также отсутствует в ROS и MRDS.

Близкий по задачам проект был реализован в 2009-2011 годах в ЦНИИ РТК и РКК «Энергия» (Россия)совместно Институтом робототехники и мехатроники Немецкого аэрокосмического центра (DRL-RMC)[1, 2]. Исследовалась возможность использования сети Интернет для управления с Земли двухзвенным роботом ROBOTIC, установленным на внешней поверхности российского сегмента Международной космической станции (МКС). Сеансы связи с бортом МКС проводились как из DRL-RMC (Германия), так и из ЦНИИ РТК (Санкт-Петербург, Россия) через DRL-RMC с использованием канала Интернет для связи ЦНИИ РТК с DRL-RMC. Особенность проекта заключалась в использовании человеко-машинного интерфейса с силомоментной обратной связью. В данном проекте рассматривалось лишь влияние задержек в каналах связи на процесс управления.

Ниже рассматривается задача территориально-распределённого управления через Интернет объединёнными в группу робототехническими комплексами (РТК), состоящими из мобильных роботов разных моделей и производителей.

Территориально-распределённое управление группой мобильных роботов

Цифровое представление данных в информационно-измерительной и управляющей системе (ИИУС) мобильного РТК позволяет выполнить объединение его электронных и мехатронных модулей в локальную вычислительную сеть (ЛВС) с мобильными узлами [3, 4]. Такой способ объединения даёт возможность распространить свойства сетевой организации на структуру ИИУС как отдельного, так и нескольких РТК, используя для этого сетевые технологии. Наиболее существенными в нашем случае следует считать такие свойства, как *реконфигурируемость* и *масштабируемость*. Эти свойства означают возможность легко наращивать или изменять любые ресурсы РТК: датчики, вычислители, микропроцессоры, формирователи радиоканала, а также иные IP-системы, в том числе объединять ИИУС нескольких мобильных РТК в единую территориально-распределённую систему. Использование сетевых технологий позволяет организовать территориально-распределённое «многооператорное» управление группировкой мобильных РТК. Термин «многооператорное» означает, что отдельные робототехнические устройства, входящие в группировку, могут управляться операторами, находящимися на разных территориях. Такое управление допускает, при определённых условиях, режим один-ко-многим, т.е. один оператор, если ему предоставлено соответствующее право, может вмешиваться в работуэлектронных и мехатронных устройств любых РТК, входящих в группировку, включая динамическое перепрограммирование вычислительных устройств, в том числе бортовых. Пример такой структуры для управления группировкой мобильных роботов (МР) приведён на Рис.1.

Рис. 1. Территориально-распределённое «многооператорное» управление группировкой мобильных роботов

Коммуникационная система, предназначенная для организации управления через Интернет и радиоканал группой мобильных мехатронных устройств, должна обладать следующими свойствами:

– обеспечивать как «непосредственную» (с бортовых телекамер), так и «стороннюю» (вид со стороны из зоны действия МР) визуальную обратную связь для дистанционного наблюдения за исполнением команд/программ управления;
– быть устойчивой к нарушениям связи;
– обеспечивать высокую производительность при передаче как длинных, так и коротких сообщений.

Рассмотрим технические и программные решения, позволяющие обеспечить указанные свойства. Сначала сформулируем основные требования, которым должен удовлетворять многокомпонентный робототехнический комплекс[5]:

1. электронные и мехатронные компоненты ИИУС РТК должны быть элементами локальной вычислительной сети с мобильными узлами;
2. связь между мобильными и стационарными модулями комплекса должна осуществляться по цифровым радиоканалам (Wi-Fi, Wi-Max и т.п.);
3. увеличение дальности и повышение качества радиосвязи следует достигать путём создания оптимальной, оперативнои дистанционно управляемой архитектуры распределённой ИИУС;
4. необходимо использовать многокамерную систему технического зрения: несколько телекамер, в том числе с функцией PTZ (Pan-Tilt-Zoom – панорамирование-наклон-масштаб), на борту мобильного модуля РТК и телекамеры на выносных устройствах – «Спутниках» (стационарных или устанавливаемых на мобильных платформах);
5. предобработка видеосигналов и сигналов от других сенсоров должна выполняться автономно на борту мобильного модуля РТК (преобразование в цифровую форму, фильтрация шумов, коррекция искажений, сжатие изображений и т.п.);
6. обязателен дистанционный (с пульта управления) оперативный контроль состояния энергосистемы и качества радиоканала;
7. пульт управления оператора должен обеспечивать:
   – непрерывное (со стандартной кадровой частотой) отображение видеопотоков со всех телекамер в виде растровых изображений;
   – мнемоническое отображение на экранах мониторов показаний иных сенсоров и состояния контролируемых параметров (в том числе звуковую сигнализацию достижения критических значений);
   – возможность удалённого управления функциями телекамер (например, PTZ) и параметрами узлов ЛВС (например, выбор алгоритма сжатия изображений или его параметров);

– возможность дистанционно контролировать исполнение на бортовой ЭВМ управляющего кода и динамически вносить в него исправление без перезагрузки системы.

8. каналы связи (как в Интернет, так и радиоканалы) должны быть защищены от несанкционированного доступа (например, за счёт использования VPN-каналов).

Структура, удовлетворяющая перечисленным требованиям, была реализована в виде специализированного программно-аппаратного комплекса, ориентированного на супервизорное управление группой учебных мобильных роботов. В основу разработанного механизма сетевого взаимодействия, посредством которого был организован полнофункциональный доступ через Интернет к мехатронным устройствам различного типа, была положена концепция «драйверов».

Концепция «драйверов»

Минимальным объектом управления в предлагаемой структуре является любое электронное или мехатронное устройство, будь то бортовой вычислитель, микроконтроллер, сенсор, манипулятор, или иной исполнительный механизм. Поэтому одной из ключевых задач, в данном случае, являлась разработка унифицированной системы правил создания ПО для конкретных моделей робототехнических устройств, позволяющих включать мехатронные компоненты в ЛВС без переработки их низкоуровневого программного кода. Иными словами, требовалось разработать конечный набор программных инструкций управления и сетевых протоколов для создания интерфейса программирования приложений (API – application programming interface). Такой интерфейс должен обеспечивать прозрачное интегрирование элементов мехатронного устройства и его ПО в информационное пространство ИИУС комплекса.

Для реализации API предлагается использовать концепцию «драйверов» – для каждого мехатронного устройства должен быть создан унифицированный сетевой управляющий протокол на базе существующих низкоуровневых программных интерфейсов взаимодействия. Тогда производитель мехатронных устройств может сравнительно просто интегрировать своё устройство в сеть, создав лишь дополнительный драйвер, реализующий детерминированные протоколом программные инструкции управления и протоколы сетевого взаимодействия. При появлении в сети нового мехатронного устройства разработанное ПО подсистемы управления комплексом в процессе взаимодействия с драйвером автоматически включает это устройство в общую сеть. Одновременно выполняется публикация доступных мехатронных устройств и их характеристик в общем каталоге технического описания.

Реализация

При реализации программно-аппаратного комплекса было обеспечено выполнение следующих свойств:

– универсальность – возможность включения в систему робототехнических и иных мехатронных систем различных моделей и производителей;
– сетевая надёжность – гарантированная доставка пакетов между управляющими интерфейсами комплекса на всех уровнях сетевого взаимодействия;
– целостность – наличие механизма управления предоставлением прав доступа и разграничением полномочий между участниками;
– гибкость и масштабируемость – децентрализация управления сетевой структурой, её *реконфигурируемость* в режиме онлайн;
– безопасность – защита от несанкционированного доступа к управляющим интерфейсам.

Организация обмена данными между элементами распределённой ИИУС реализована на основе хорошо зарекомендовавших себя сетевых технологий и решений с использованием синхронного и асинхронного взаимодействия на основе стека протоколов TCP\IP. Она состоит из следующих компонент:

– протоколы синхронного и асинхронного обмена сообщениями;
– единый каталог сервисов;
– программный модуль оператора.

Согласно классификации известной модели OSI, взаимодействие в нашем случае происходит на прикладном уровне, который мы условно разделяем на 2 подуровня: *транспортный* и *логический*.

К *транспортному* подуровню были предъявлены следующие требования:

– высокая производительность при передаче как длинных сообщений (мегабайты), например, многопотоковое видео, так и коротких (байты) – команды управления;
– устойчивость к обрывам связи, например, из-за неустойчивой работы радиоканала;
– возможность организации взаимодействия один-ко-многим, что необходимо для задач группового управления.

К *логическому* подуровню были предъявлены следующие требования:

– кроссплатформенность и многоязычность – возможность вести разработку в различных операционных системах (Windows, Linux x86\64\arm, Android, МЦСТ Эльбрус) и на различных языках (C, Java, Python, Fortran);
– человеко-читаемость – возможность воспринимать получаемую информацию, не прибегая к специфическим программным средствам (для этого данные передаются в текстовом виде, кроме тех случаев, когда это критично для производительности, например, в случае передачи видеопотока);
– возможность изолированной работы – работоспособность взаимодействующих мехатронных устройств, входящих в ЛВС того или иного уровня иерархии, не должна нарушаться при отключении их от внешней для них сети (более высокого уровня);
– децентрализованность и способность к самоорганизации – отсутствие необходимости в существовании какого-либо “центрального” сервера, регламентирующего работу всех компонент системы, кроме случаев ограничения доступа и регистрации участников.

Реализация обмена сообщениями выполнена на базе библиотеки ZeroMQ, поверх которой реализована модель взаимодействия *акторов*[6]. Благодаря такой конструкции, обеспечивающей диспетчеризацию сообщений, удается реализовать дистанционное динамическое, т.е. без прекращения работы, изменение исполняемого кода на бортовой ЭВМ. Подробнее используемый подход описан в работе[7]. Созданный программный продукт полностью удовлетворяет перечисленным требованиям. Дополнительным преимуществом является использование библиотеки по лицензии GNU LGPL V3, т.е. эта библиотека является свободно распространяемым программным обеспечением.

Заключение

Предложенная структура территориально-распределённого управления через каналы Интернет группой мобильных роботизированных устройств была реализована в виде программно-аппаратного комплекса и показала свою эффективность в части создания действующих каналов для многооператорного управления учебными роботами типа «АМУР» (Автономный Учебный Мобильный Робот, МЛ «Сенсорика») и «Robotino» (немецкий концерн Festo). Такой постоянно действующий канал управления через Интернет в настоящее время функционирует между МГТУ «СТАНКИН» (г. Москва) и Центром технологической поддержки образования Международного института новых образовательных технологий (ЦТПО МИНОТ) РГГУ (г. Москва). Аналогичный канал действует также между ИПМ им. Келдыша РАН (г. Москва), ЦТПО МИНОТ РГГУ и ДВФУ (г. Владивосток).

Использование данной территориально-распределённой сетевой структуры ИИУС обеспечивает простоту подключения к управлению мобильными роботами комплекса специалистов разного профиля, находящихся далеко от места проведения работ, в том числе из фирм - изготовителей.

Данная информационно-коммуникационная инфраструктура может использоваться в системе дистанционного образования [5, 8, 9] для организации доступа учащихся к реальным мехатронным системам, расположенным на удалённых территориях, например, для подключения филиалов к лабораторной базе основного учебного заведения. Это позволит сосредоточить технические ресурсы в одном месте и организовать обучение групп студентов дистанционно (из филиалов), не снижая качество обучения. Кроме того, данная структура позволяет объединить территориально разнесённые научно-исследовательские коллективы вокруг какого-либо одного, обладающего соответствующей материально-технической базой, или же объединить мехатронные устройства разных коллективов в единую систему с доступом каждого-к-каждому.

1. Jordi Artigas, RyuJee-Hwan, C.Preusche and G.Hirzinger. Network representation and passivity of delayed teleoperation systems. Intelligent Robots and Systems (IROS), 2011 IEEE/RSJ International Conference on 25-30 Sept. 2011, pp.177-183.
2. Гук М.Ю. Контур-2: совместный российско-германский космический эксперимент по силомоментному управлению наземными роботами с борта МКС / Гук М.Ю., Силиненко А.В. // Экстремальная робототехника. Труды международной научно-технической конференции. – Санкт-Петербург: Изд-во «Политехника-сервис», 2014. – С.59 – 64.
3. Андреев В.П. Сетевые технологии для мобильных роботов в экстремальных средах / Андреев В.П., Пряничников В.Е. // Экстремальная робототехника: Сборник докладов Всероссийской научно-технической конференции. – Санкт-Петербург: Изд-во «Политехника-сервис», 2012. – С.462 – 472.
4. Pryanichnikov V.E. The Application of Network Technologies to Constructing Group Controlled Systems with Machine Vision for Mobile Robots / Pryanichnikov V.E., Andreev V.P. // Annals of DAAAM for 2012& Proceedings of the 23th international DAAAM Symposium "Intelligent

Manufacturing & Automation" 24-27th October 2012 Zadar, Croatia, ISSN 2304-1382, 2012. – V.23, No.1. – P.1167 – 1174.
5. Андреев В.П., Учебно-научная виртуальная территориально-распределённая робототехническая лаборатория / Андреев В.П., Кирсанов К.Б., Пряничников В.Е. // Экстремальная робототехника. Труды международной научно-технической конференции. – Санкт-Петербург: Изд-во «Политехника-сервис», 2014. – С.234 – 239.
6. Carl Hewitt, et al. Actor Induction and Meta-evaluation Conference Record of ACM Symposium on Principles of Programming Languages, January 1974.
7. Андреев В.П. Построение автоконфигурируемой сети мехатронных устройств для задач территориально-распределённого управления / Андреев В.П., Кирсанов К.Б., Плетенев П.Ф. // Экстремальная робототехника: Сборник докладов Международной научно-технической конференции.Санкт-Петербург, 8-9 октября 2015г.
8. Кувшинов С.В. IT-технологии создания креативной образовательной среды / Кувшинов С.В., Подураев Ю.В., Пряничников В.Е. // Информационно-измерительные и управляющие системы. – М.: Радиотехника, – 2013. – Т.11, №4. – С.93 – 96.
9. Education on the basis of virtual learning robotics laboratory and group-controlled robots / Andreev V., Pryanichnikov V.,Poduraev Y.,KuvshinovS. // 24th DAAAM Int. Symp., 2013. Procedia Engineering, 2014. – V.69. – P.35 – 40.

S. Gerasuto, Ry. Prakapovich, V. Sychev

SIZE SCALING FEATURES INVESTIGATION FOR GROUP OF SMALL-SIZED MOBILE ROBOTS BASED ON CENTRALIZED AND DECENTRALIZED METHOD OF MANAGING

United Institute of Informatics Problems (UIIP), Minsk, Belarus
contacts@robotics.by, rprakapovich@robotics.by, vsychyov@robotics.by

С.Л. Герасюто, Г.А. Прокопович, В.А. Сычёв

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ МАСШТАБИРОВАНИЯ ЧИСЛЕННОСТИ ГРУППЫ МАЛОГАБАРИТНЫХ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ ПРИ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОМ И ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОМ СПОСОБАХ УПРАВЛЕНИЯ*

Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси сектор робототехники лаборатории моделирования самоорганизующихся систем, Минск
contacts@robotics.by, rprakapovich@robotics.by, vsychyov@robotics.by

Введение

С ростом количества эксплуатируемых пользователями роботов актуальным становится исследование управления группами робототехнических аппаратов. Использование большого количества одновременно задействованных роботов особенно характерно для персональных бытовых роботов и спортивной робототехники. Исторически, лучше всего разработаны методы управления группой роботов для обеспечения промышленного производства, но их применение в системах управления мобильными роботами ограничено рядом объективных факторов. Важнейшим из которых является отсутствие возможности строго детерминировать среду и условия функционирования мобильных роботов, исключив учет неопределённостей. Функционирование же роботов в априори неизвестной и недетерминированной изменяющейся среде требует разработки новых методов и алгоритмов управления, а также методов тестирования и отладки полученных решений.

Целью данной работы является исследование зависимостей времени принятия управляющих решений и объёма информационного обмена от параметров группы роботов при централизованном и децентрализованного управлении на примере компьютерной и натурной моделей групп роботов.

Анализируя доступные научные результаты, относящиеся к проблеме группового управления роботами, полученные с помощью компьютерного моделирования и математических методов исследований мы заметили слабое практическое применение известных теоретических результатов.

Как известно каждая группа роботов проектируется из определенных комплектующих и функционирует под управлением своих программных средств, что существенно влияет на их совместную работу над общей задачей. В наших исследованиях мы сопоставляем практический результат, полученный на экспериментальных роботах с результатами, предсказанными в

* Работа выполнена при поддержке БРФФИ-М, договор №Ф14М-139 «Разработка алгоритмов дистанционного централизованного управления группой мобильных роботов» (2014-2016 гг.) и портала http://www.robotics.by [9]

теоретических работах. Это позволяет описать характеристики, уточнить необходимые условия функционирования, разъяснить и подтвердить на практике теоретические предпосылки, функционирования таких систем.

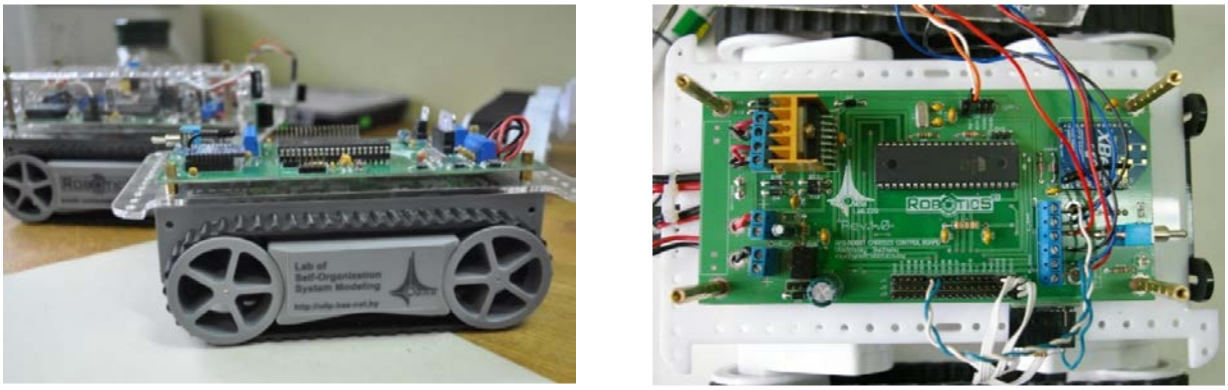
В теоретических работах [1]-[3] детально рассмотрены проблемы управления большими группами роботов. Авторами указанных работ найдены четыре фундаментальные стратегии управления. Это единоначальная, иерархическая, коллективная и стайная стратегии. Предложена сравнительная оценка времени группового решения при различных стратегиях управления. Обоснована целесообразность проведения дополнительных исследований, создания и эксплуатации групп роботов для применения в промышленности, быту и военной сферах.

1. Методика исследований и описание экспериментальных роботов

Экспериментальные исследования проводились в два этапа. На первом этапе проведены натурные испытания с использованием группы экспериментальных мобильных роботов [4]. Группа состоит из восьми роботов и центральной ЭВМ. Каждый робот оснащён радиомодемом XBeePro, работающим в широковещательном режиме, микроконтроллерной системой управления нижнего уровня и гусеничным шасси с габаритами 150x190x100 мм (Рисунок 1, *а*).Внешний вид платы системы управления нижнего уровня с установленным радиомодемом XBeePro показан на Рисунке 1, *б*.

Система управления нижнего уровня реализует адресный приём пакетов данных от центральной ЭВМ, и исполнение управляющих команд, а также отправку на центральную ЭВМ сенсорных данных.

Центральная ЭВМ оснащена радиомодемом того же типа, что и роботы. Её программное обеспечение позволяет осуществлять информационный обмен с роботами, сохранение данных и формирование команд управления с интервалом в сто миллисекунд.



а) *б)*

Рис. 1. Прототип мобильного робота для задач группового управления

Для взаимодействия роботов и центральной ЭВМ разработан сетевой протокол, базирующийся на физическом и канальном уровнях XBeePro и реализующий прикладной уровень модели OSI, а также элементы сетевого и транспортного уровней в объёме, необходимом для управления группой роботов [5].

Использование действующих роботов позволило определить основные соотношения, характеризующие процессы передачи информации в группе роботов. Определены зависимости времени передачи пакета данных от размера пакета, влияние удаления роботов на мощность сигнала (*RSS*) и на связанные с этим ошибки передачи, максимально допустимое число одновременно работающих на передачу в широковещательном режиме радиомодемов.

Полученные экспериментальные данные использованы на втором этапе, заключающемся в компьютерном моделировании группы роботов, управляющихся централизованно и децентрализовано. Таким образом, предпринята попытка экстраполировать реальные данные на бо́льшее число роботов, функционирующих в больших помещениях с более сложной конфигурацией.

2. Результаты экспериментовпо передаче данных в группе роботов

Управление роботами осуществляется командным способом, на скорости 19200 бит/с. Отправка управляющих команд роботам осуществляется каждые сто миллисекунд, что является одним тактом системы управления.

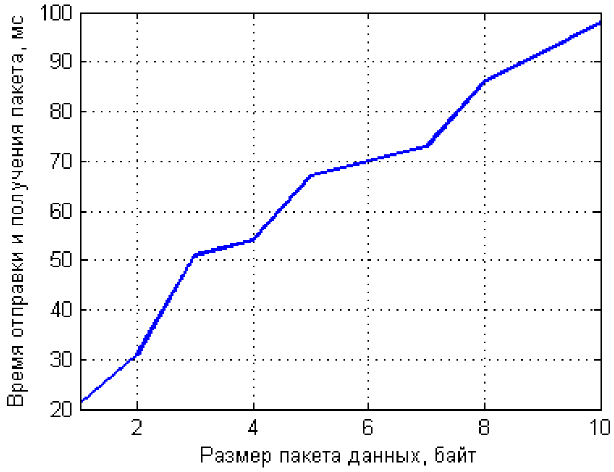


Рис. 2. Зависимость времени отклика от робота при разных размерах

Однако в связи с особенностями операционной системы Windows реальная скорость информационного обмена центральной ЭВМ с роботами составляет порядка 3200 бит/с, как видно из графика на Рисунке 2. График на данном рисунке показывает время так называемого пинга робота, складывающееся из времени отправки пакета данных, получения его роботом и отправки роботом обратно того же пакте (эха).

Таким образом, используя текущий протокол, возможно осуществлять управление не более чем десятью роботами за один такт системы управления в лабораторных условиях.

В результате натурных испытаний на действующих моделях роботов была получена зависимость числа потерянных пакетов данных, в процентах, от величины*RSS*, dBm.(Рис. 2). Как видно из графика, число потерянных пакетов данных растёт нелинейно с уменьшением мощности сигнала. Измерения проводились при отправке ста пакетов данных с последующим получением ответа (эха) от роботов и постепенным удалением роботов от передатчика.

Было отмечено значительное снижение числа успешно отправленных пакетов при отдалении роботов на максимально допустимую для радиомодемов дальность (Рис. 3).

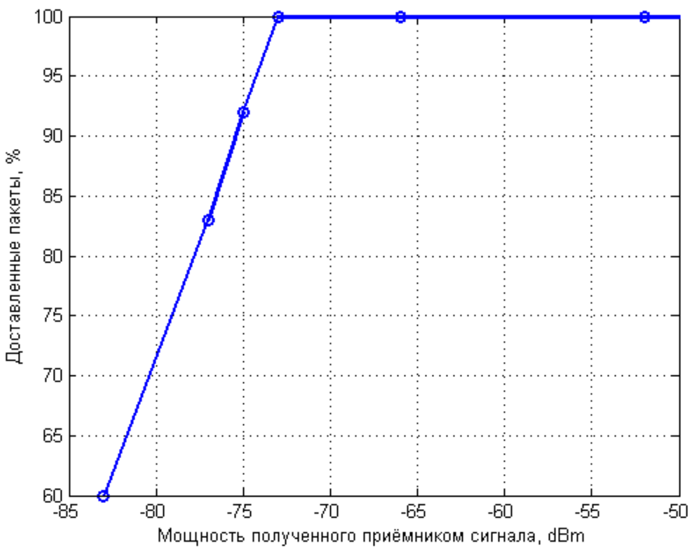


Рис. 3. Зависимость количества доставленных пакетов от мощности полученного приемником сигнала

3. План экспериментов по имитационному моделированию

Для количественного подтверждения и корректировки приведенного в [1] графика зависимости времени принятия решения от способа группового управления было проведено имитационное моделирование функционирование группы роботов при двух различных способах управления: централизованном и децентрализованном. Задача моделирования заключалась в поиске искомых объектов в априори неизвестной местности. Моделируемая местность была представлена дискретным полем в виде плоского квадрата размером 256×256 клеток, 20% из которых являлись преградами. Причём размер клеток соизмерим с габаритами мобильных роботов, чтобы они могли беспрепятственно развернуться на месте. Если в качестве прототипа группы роботов использовать указанные выше мобильные роботы, то в эксперименте можно имитировать складское помещение порядка 6 тыс. квадратных метров.

План эксперимента заключался в следующем: 1) установка одного из выбранных способов группового управления; 2) генерация новой карты местности фиксированного размера путём расстановки случайным образом преград; 3) выставление роботов на стартовую позицию – в нижний правый угол дискретного поля; 4) расстановка случайным образом 3-х искомых объектов; 5) запуск функционирования роботов с постоянным подсчётом шагов модельного времени; 6) прекращение моделирования при условии, что в область старта были доставлены по крайней мере два из трёх искомых объекта; 7) увеличение числа членов группы мобильных роботов на одну единицу (от 1 и до 64).

Под шагом модельного времени понимается такт системы управления предполагаемой системы управления групповыми мобильными роботами как при централизованном, так и при децентрализованном способах управлении. Другими словами, во время каждого шага модельного времени (такта системы группового управления) в зависимости от выбранного способа управления происходит передвижение фиксированного числа мобильных роботов на одну клетку (если для этого есть возможность). Искомый объект является найденным и распознанным только тогда, когда любой из роботов окажется с объектом на одной клетке. Таким образом, в моделировании не учитываются временные и вычислительные затраты систем управления членов группы. Результаты моделирования продемонстрируют требования к производительности и характер поведения всей группы.

Для реализации централизованного способа управления был модифицирован ранее предложенный антропоморфный алгоритм [7], который был разработан для точного ориентирования одиночного мобильного робота в пространстве в априори неизвестной местности. Алгоритм был изменён таким образом, что локальные данные сенсорных систем всех мобильных роботов, полученные за каждый такт системы управления, регистрируются в едином вычислительном центре.

В качестве демонстрации работы децентрализованного подхода использовалсятакже ранее предложенный алгоритм на основе аналогии муравьёв фуражиров[8], в котором предполагается, что стая роботов состоит из функционально равнозначных и технически простых и однотипных роботов, действия которых основаны на простых логических правилах.

4. Анализ алгоритмов и результатов имитационного моделирования

На следующих графиках функций приведены количественные показатели результатов проведённых имитационных экспериментов по совместному решению задачи поиска объектов в неизвестной местности (Рисунок 4). Следует заметить, что на указанном графике к централизованному управлению относятся две функции. Это связано с тем, что в эксперименте была предпринята попытка учесть некоторые физические параметры системы централизованного управления группой указанных выше реальных мобильных роботов, которые естественным образом влияют на эффективность работы всей группы в целом. Как было выявлено при различных реальных испытаниях группы мобильных роботов, самым уязвимым элементом, подверженным внешним воздействиям, является модуль беспроводной связи.

Первый график функции, относящийся к централизованному управлению, учитывает только зависимость числа полученных системой управления мобильным роботом пакетов данных от расстояния до вычислительного центра. На основании графиков потери пакетов при отдалении роботов на максимально допустимую для радиомодемов дальность на модель были наложены следующие ограничения:

1. 100% вероятность получения пакетов при расстоянии мобильного робота от точки старта не больше 200 клеток;
2. 90% – от 200 до 250 клеток;
3. 60% – от 251 до 256 клеток.

Второй график иллюстрирует способ группового управления, в котором учитывалось ещё и конечное число мобильных роботов, которым вычислительный центр может передать управляющие команды. Учитывая практический опыт и указанный выше протокол передачи данных, в проведённом эксперименте принималось, что в каждый шаг модельного времени вычислительный центр может управлять только 10 мобильными роботами.

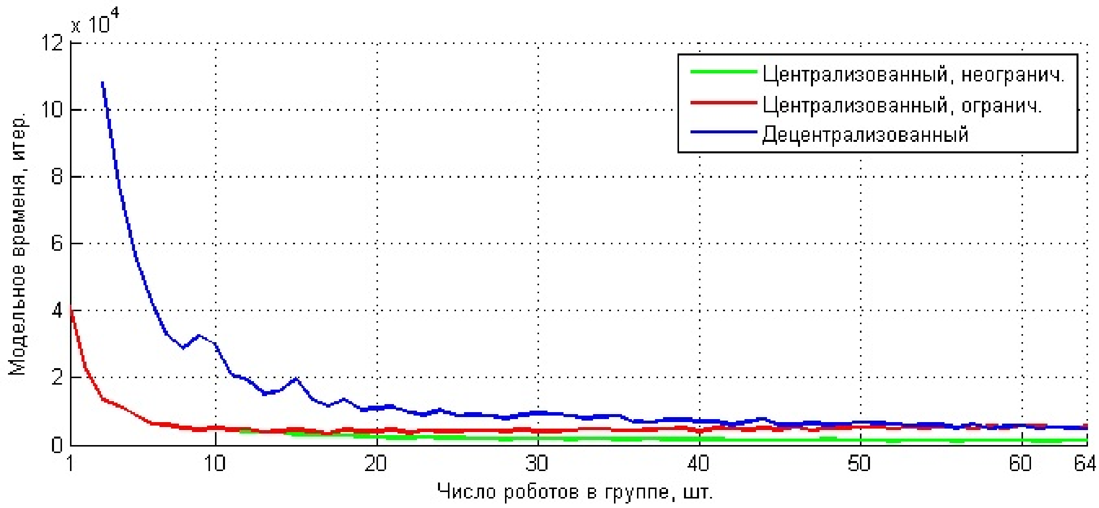


Рис. 4. Зависимость числа шагов модельного времени от числа роботов в группе

Для уменьшения статистической погрешности указанных и последующих значений показателей функционирования группы роботов при различных способах управления было проведено 30 измерений каждого из 2×64 опытов.

Рассмотрим результаты децентрализованного способа управления. Как видно из третьего графика, с ростом числа членов группы модельное время, необходимое для выполнения поставленной задачи, постоянно уменьшается, особенно до размера группы в 30 роботов, после которого падение происходит гораздо медленнее. Заметим, что рассматриваемый график функции начинается по оси абсцисс не с единицы. Это связано с тем, что предложенный децентрализованный алгоритм позволяет решить задачу только начиная с 3-х роботов.

На следующем рисунке приведены графики функций, иллюстрирующие зависимость эффективности выполнения поставленной задачи от числа мобильных роботов в группе при различных способах управления, которые были получены путём вычисления обратных значений данных из описанных экспериментов.

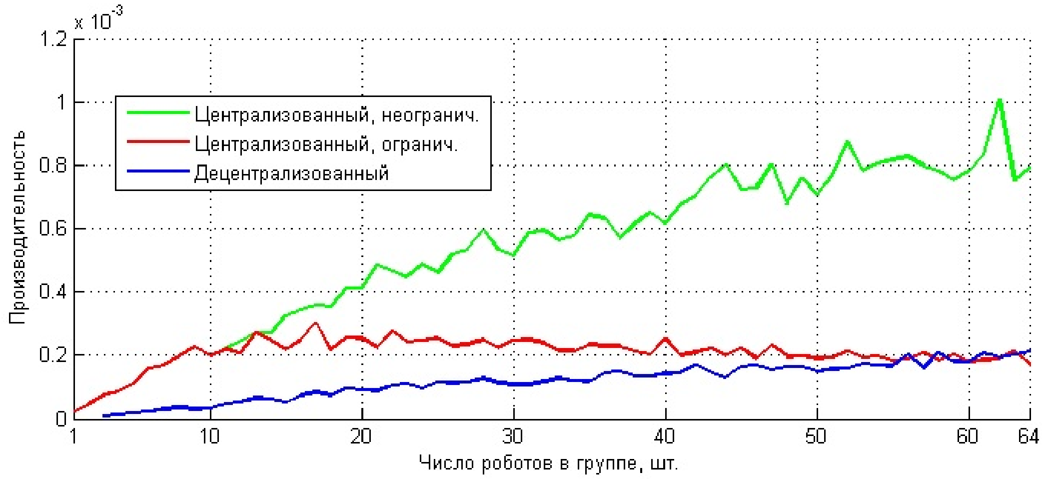


Рис. 5. Зависимость производительности различных способов управления от числа роботов в группе

Можно заметить, что при децентрализованном управлении с ростом количества членов группы эффективность растёт практически прямолинейно. При централизованном управлении явна заметна нелинейность из-за введённых ограничений, причём, на втором графике явно заметно влияние пороговой величины, ответственной за максимально возможное число одновременно обслуживаемых роботов.

Заключение

В работе исследованы особенности масштабирования численности группы малогабаритных мобильных роботов при централизованном и децентрализованном способах управления с учетом ряда ограничений связанных со способом передачи команд по каналам связи. Подтверждены, уточнены и разъяснены фундаментальные основы по выбору стратегий управления посредством анализа практических результатов одновременно со значениями, полученными после имитационного моделирования.

Проведённые эксперименты показали, что предложенные алгоритмы централизованного и децентрализованного способов управления позволяют роботам как целостной системе последовательно и методично обследовать всю доступную территорию, даже при выходе из строя нескольких своих членов. Следовательно, конечный результат взаимодействия роботов в группе зависит только от их количества и способностей распознавать искомый предмет.Благодаря тому, что при централизованном способеуправления вычислительный центр обладает глобальной информацией о всех исследованных областях карты местности и расположении роботов, это позволяет всей группе действовать более эффективно, чем при децентрализованном управлении.Однако, при достижении определённого количества членов группы производительность централизованного способа управления оказывается не выше, чем при централизованном.

1. Интеллектуальные роботы: учебное пособие для вузов / И.А. Каляев [и др.] ; под общ. ред. Е.И. Юревича. – М. : Машиностроение, 2007. – 360 с.
2. Каляев, И.А. Распределённые системы планирования действий коллективов роботов / И.А. Каляев, А.Р. Гайдук, С.Г. Капустян – М.: Янус-К, 2002. – 292 с.
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. Сычёв, В.А. Система централизованного группового управления мобильными роботами / В.А. Сычёв // Электроника Инфо (рецензируемый раздел). – 2014. - №6 (108). – С. 40-43.
5. Герасюто, С.Л. Разработка протокола и программно-аппаратного обеспечения системы централизованного управления группой роботов / С.Л. Герасюто, В.А. Сычёв // Автоматизация и роботизация процессов и производств: материалы республиканского научно-практического семинара / редкол.: Пантелеенко Ф.И. (гл. ред.) [и др.] Минск : Бизнесофсет, 2014. – 2014. С. 101-102.
6. Сычёв, В.А. Способ централизованного управления группой роботов по общему каналу / В.А. Сычёв // Международная научно-техническая конференция, приуроченная к 50-летию МРТИ-БГУИР (Минск, 18-19 марта 2014 года): материалы конференции. В 2 ч. Ч.1 / редкол.: А.А. Кураев [и др.]. – Минск: БГУИР, 2014. – С. 304-305.
7. Прокопович, Г.А. Алгоритм пространственного ориентирования мобильного робота в незнакомой местности / Г.А. Прокопович // Сб. мат. Междунар. форума студ. и уч. мол. «Первый шаг в науку – 2007». – Минск : «Изд. дом «Белорусская наука». – С. 428-432.
8. Прокопович, Г.А. Об одном методе децентрализованного управления группой роботов / Г.А. Прокопович // Робототехника. Взгляд в будущее: материалы Междунар. семинара, Санкт-Петербург, 10-11 марта 2010 г. – СПб : Политехника-сервис, 2010. – С. 199-202.
9. Робототехника в Республике Беларусь [Электронный ресурс] / Roboticsby. – Минск: 2015. – Режим доступа: http://www.robotics.by/. – Дата доступа: 12.06.2015.

N. Kazachek, V. Lokhin

FUZZY P-CONTROLLER DESIGN BASED ON THE METHOD OF HARMONIC BALANCE

MIREA, Moscow, Russia
nkazachek@yandex.ru

In recent years, intelligent control systems are increasingly used in various applications, civil and special purpose.Firstofallitrelatedwithperfectionofvarioustypesofengineeringtechnologies, asaresult, requirements to control systems are increased: high speed and running accuracy(servo drives, guidance system, items of microsystem technology, etc.). In addition, another important requirement to such systems is to improve the control quality in conditions of various factors of uncertainty (temperature changes in the coefficients of viscous friction; size changes in the back play and backlash of the driver transmission elements; mismatch in dynamic characteristics of the power switches for required frequency range; various types of perturbations, which both act upon the shaft of operating motor and its input, etc). As show the studies of foreign [1, 2] and local [3-5] scientists, the application of intelligent technology (IT) can provide all of the above requirements, submitted to the modern control systems. However, implementation of IT into the engineering practice goes rather slowly, mainly because the constructive methods of analysis and synthesis are absent. Actuality of this problem became the basis of the presented research.

This paper present the intelligent control systems based on fuzzy logic technology. Taking into consideration the researches conducted in [6, 7], which show the redundancy of universal design of PID - controller (both classical and fuzzy) for objects of different classes, its simplified modification, the fuzzy P controller (FPC) are invited to consider. Block diagram of the system shown in Fig. 1.

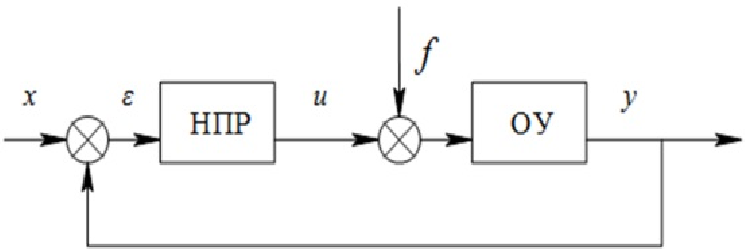
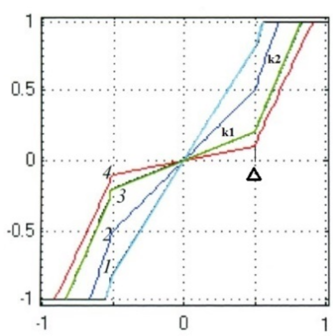
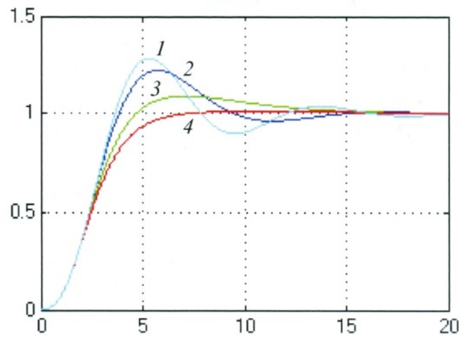


Fig. 1. Block diagram of the ACS with fuzzy P-controller (FPC);
CO- control object, x – reference variable, f – external disturbances.

As shown by studies [4, 8], all transformation in the fuzzy controllers are essentially non-linearand this explains the improvement of the control quality of ACS with fuzzy controllers:the value of the gain of the FPC is changing in the process of processing the reference variable (Fig. 2).





а б

Fig. 2. The influence of the nonlinear characteristic of the FPC (a)
on the quality of the transition process (b)

Parameters of the nonlinear characteristic of the FPC depend on several factors: the dimension of the term - the sets of linguistic variables, the shape and relative position of the membership functions of individual terms, the priority of the relationship of input and output terms. By varying these factors, taking into account the influence of the parameters of the nonlinear characteristics of the FPC on the dynamics of the system, the authors have developed a generalized technique of forming a non-linear transformation in the FPC [6, 7].

Taking into consideration the non-linear nature of the transformation U (ε) in the FPC,the need to study the dynamics of the system and first of all study the stability arise.It is obvious, that to solve this problem, we can use the modified research methods of non-linear systems, for example, analogue of the unconditional stability criterion of VM Popov and method of harmonic balance.

According to this criterion, the condition of stability of the equilibrium of such a system takes the form:

$$\mathrm{Re}[1+jq\omega]\cdot W_{CO}(j\omega)+\frac{1}{k}>0 \tag{1}$$

Where q - real number (positive or negative), W_{CO} frequency response of *CO*, k - the slope of the vector, limiting sector, within which are non-linear characteristics *U(ε)*.However, features of the type of non-linear transformation of the FPC, especially the flex point (s) in it, leads to the need to apply the criterion of absolute stability of the processes (considering Fig.2), that can be written as:

$$\mathrm{Re}\cdot W_{CO}(j\omega)+\frac{1}{k_S}>0 \tag{2}$$

$$0<\frac{\delta U(\varepsilon)}{\delta\varepsilon}<k_s$$

where k_S is the slope of the steepest part of the nonlinear characteristics *U(ε)*.Graphic interpretation of condition (2) is shownin Fig. 3, where $W_{CO}(p)=50[p(1+0{,}002p)(1+0{,}05p)]^{-1}$.

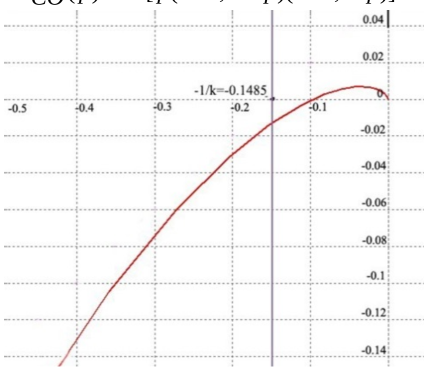


Fig. 3. Graph-analytical interpretation of the conditions for the absolute stability of processes of ACS with fuzzy P-controller

As can be seen, the condition (2) is violated. It is easy to show that the condition (1) for the same system will be implemented. Comparison of conditions (1) and (2) shows that the criterion of the absolute stability of processes is more "rigid", that's why it will have to be used in analysis and synthesis parameters of FCP. At the same time it is important to emphasize that, in one hand, the conditions (1) and (2) are sufficient and consequently it is difficult to give a reliable estimate of the stability region, on the other hand, the more "rigid" requirements for condition (2), in most cases, lead to non-compliance of it, which leads to the use of alternative approaches to the analysis ACS with FPC, one of which is a method of harmonic balance [6, 9].

Complex gain of the nonlinear element $W_{FPC}(A)$ (similar to a presented in Fig. 2) can be written in the form:

$$W_{FPC}(A)=\frac{2}{\pi}\left[(k_1-k_2)\arcsin\frac{a}{A}+k_2\arcsin\frac{b}{A}+\frac{2k_2a+2c-k_2b}{A}\sqrt{1-\left(\frac{b}{A}\right)^2}-\frac{k_2a+k_1a}{A}\sqrt{1-\left(\frac{a}{A}\right)^2}\right],$$

$$k_1=\frac{d}{a},k_2=\frac{c-d}{b-a} \tag{3}$$

Where A is input signal amplitude; $k_1$and$k_2$areslopeofcurve*1*-th and*2*-th part of the nonlinear characteristics *U(ε);(a,d)*and*(b,c)*arecoordinatesofflexpointofthenonlinearcharacteristic*U(ε)*.

The solution of equation of harmonic balance is reduced to the definition of the points of intersection of the characteristics $-W_{FPC}{}^{-1}(A)$ and $W_{CO}(j\omega)$, grapho-analytical interpretation of which is shown in Fig.4 (for the same example as in Fig. 3).

As shown in Fig.4, there are no oscillations in the system. It should be noted, the values that define the boundary of the absence of oscillations, closer to the values that define the range of absolute stability of processes, but not to the values that define the range of absolute stability of the equilibrium (Fig. 3).This suggests that the method of harmonic balance is more precise (in case, the order of the control object is not less than a three).Moreover, it possible to get an indirect estimation of quality, using the methodology presented in [9, 10], on the basis of the method of harmonic balance.

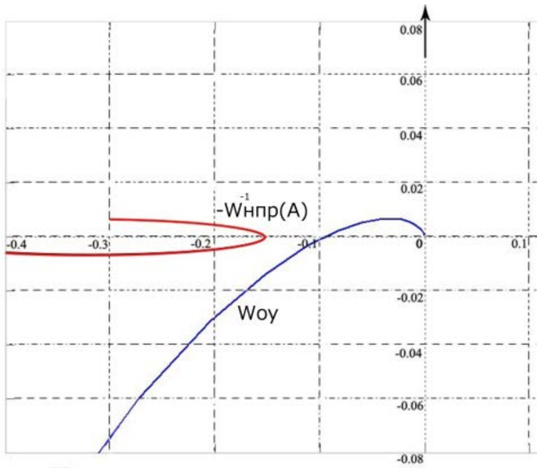


Fig. 4. Graph-analytical solution of the harmonic balance of ACS for FPC

Consider an indirect estimation of quality of ACS with the FPC in grapho-analitical form. So, Fig. 4 shows the equivalent complex gain of FPC $-W_{FPC}{}^{-1}(A)$, obtained from (3) for non-linear transformation of the form Fig. 2a.Then according to [9] , Fig. 6a shows a set of curves corresponding to different oscillation parameters ACS with the FPC (Fig. 5), where *c*– is oscillation index(whenc=1,1 σ=10%, whenc=1,2 σ=20%, whenc=1,3 σ=30%).Fig. 6b shows the transient of system.

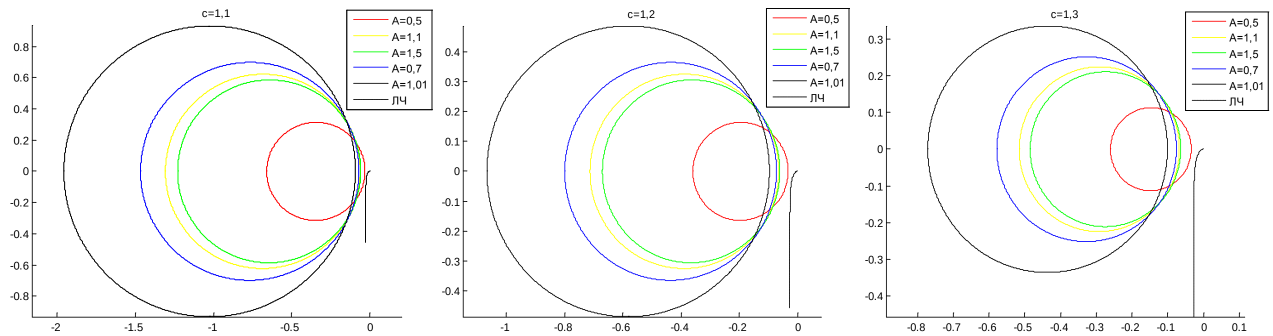
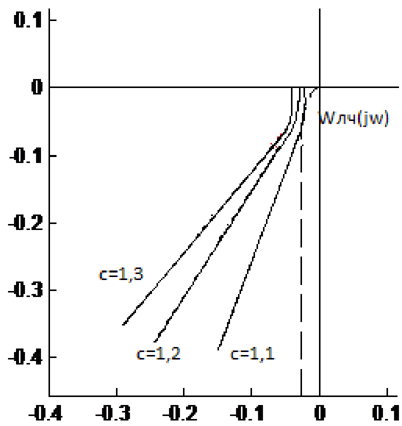
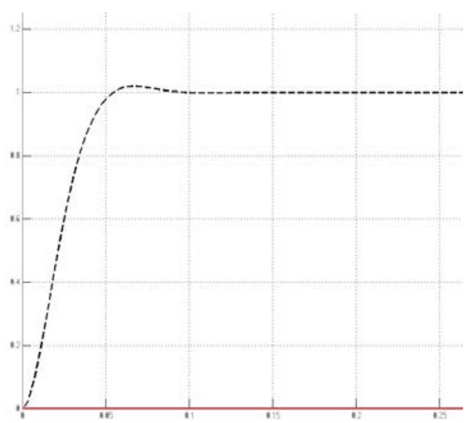


Fig. 5.Oscillation indexes of SAU with fuzzy P-controller



a



б

Fig. 6.Thesetofcurves, corresponding to different oscillation indexes (a) transient of system (b)

Indirect estimation of oscillation index (and accordingly, overshoot) is carried when the hodograph of linear part $W_{CO}(j\omega)$ and one of the curves from Fig. 6a. have a tangential point. By varying the parameters of the nonlinear transformation (the slope coefficient k_1 and k_2, and the inflection point Δ)it is possible to change $-W_{FPC}{}^{-1}(A)$, respectively curves in Fig.6, and, therefore the overshoot in the system.

So, the obtained grapho-analytical method of indirect estimation of quality based on the method of harmonic balance is sufficiently precision and convenient to analyze the ACS with the FPC and is quite constructive tool for the synthesis of non-linear transformation in a fuzzy controller.

To determine the direction vector further research it is worth noting some of the shortcomings of this approach. Firstly, the harmonic balance method is applicable to systems not less than the third order; This condition is determined by the need to perform hypothesis filter. Second, the harmonic balance method does not provide an estimation of the stability region of the system, although, as shown in this paper the values that define the area of sustainability and value indicating whether the oscillations are close enough.

It is obvious that developing, known in the theory of nonlinear ACS, techniques of improve the accuracy of the harmonic balance method, the obtained result can be modified for fuzzy PI - and PD - controllers.

1. A Piegat. Fuzzy modeling and control, PhysicaVerlag Heidelberg, 728 p. 2001.
2. Bing-Fei Wu, Li-Shan Ma, Jau-WoeiPerng, Hung-I Chin, Absolute stability analysis in uncertain static fuzzy control systems with the parametric robust Popov criterion.:Fuzzy Systems, FUZZ-IEEE 2008. (IEEE World Congress on Computational Intelligence). IEEE International Conference on, pp. 1325 – 1330, 2008.
3. Intellektual'nyesistemyavtomaticheskogoupravlenija./ Pod red. I.M. Makarova, V.M. Lohina. – M.: FIZMATLIT, 2001. – 576p.
4. Iskusstvennyjintellekt i intellektual'nyesistemyupravlenija/ I.M. Makarov, V.M. Lohin, S.V. Man'ko, M.P. Romanov; [otv. red.I.M. Makarova]; Otdelenie inform. tehnologijivychislit. sistem RAN. – M.: Nauka, 2006. – 333p.
5. Avtomatizacijasintezaiobuchenieintellektual'nyhsistemupravlenija/otv. red. I.M. Makarov, V.M. Lohin; Otd-ie inform. tehnologijivychisl. sistem RAN. – M.: Nauka, 2009. – 228 p.
6. N. Kazachek, V. Lokhin, V. Ryabcov. Integrated dynamics research of control systems with fuzzy P–controller. 2015 3rd InternationalConferenceonIntelligent Mechatronics and Automation-ICIMA 2015
7. Nauchno-tehnicheskijotchetpogodovomujetapunauchno-issledovatel'skojraboty № 784 v ramkahbazovojchastigosudarstvennogozadanija v sferenauchnojdejatel'nostipoZadaniju № 2014/112 za 2014 g
8. Makarov I.M., LohinV.M. Intellektual'nyesistemyavtomaticheskogoupravlenija. – M.: Fizmatlit, 2001, 576p.
9. Teorijaavtomaticheskogoupravlenija Pod red A.V NetushilaUchebnikdljavuzovIzd 2-e pererabidop.-M.: Vysshajashkola, 1976-280 s., 1983 – 432p.
10. A. Beléndez, A. Hernández, T. Beléndez, M.L. Álvarez, S. Gallego, M. Ortuño, C. Neipp, Application of the harmonic balance method to a nonlinear oscillator typified by a mass attached to a stretched wire, Journal of Sound and Vibration, Vol. 302, Iss. 4-5, 2007

Н.А. Казачек, В.М. Лохин

СИНТЕЗ НЕЧЕТКОГО П-РЕГУЛЯТОРА НА ОСНОВЕ МЕТОДА ГАРМОНИЧЕСКОГО БАЛАНСА

Московский государственный университет информационных технологий, радиотехники и электроники (МИРЭА), Москва
nkazachek@yandex.ru

Интеллектуальные системы управления в последние годы находят все более широкое применение в различных приложениях гражданского и специального назначения. В первую очередь это связано с совершенствованием различных образцов техники, следствием чего является все более возрастающие требования к системам управления: высокая скорость и точность перемещений (следящие приводы, системы наведенияи др.). Кроме того, еще одним важным требованием к таким системам является повышение качества управления в условиях воздействия различных факторов неопределенности (изменение величины люфта и зазора в передаточных элементах привода, различного рода возмущения, приведенные как к валу исполнительного двигателя, так и к его входу и др). Как показывают исследования зарубежных [1, 2] и отечественных[3-5] ученых, применение интеллектуальных технологий (ИТ) может обеспечить все вышеперечисленные требования, представляемые к современным системам управления. Однако в инженерную практику ИТ внедряются достаточно медленно, в основном из-за отсутствия конструктивных методов их анализа и синтеза. Актуальность этой проблемы легла в основу представленной работы.

В данной статье рассматриваются интеллектуальные систем управления, построенные на технологии нечеткой логики. Учитывая исследования, проводимые в работах [6, 7], которые показывают избыточность универсальной структуры ПИД – регулятора (как классического, так и нечеткого) для объектов различных классов, предлагается рассмотреть его упрощенную модификацию типа нечеткого П-регулятора (НПР), структурная схема системы представлена на Рис. 1.

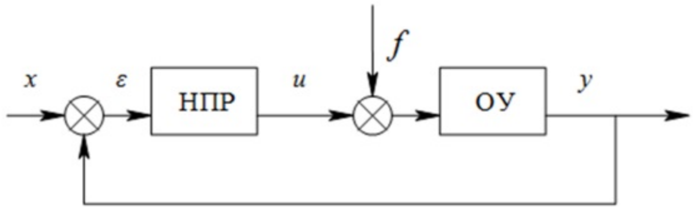
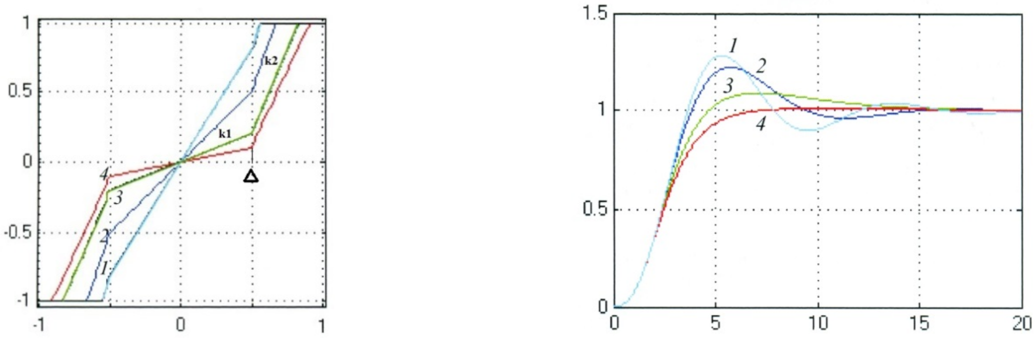


Рис. 1. Структурная схема САУ с нечетким П-регулятором;
ОУ-объект управления, x – задающее воздействие, f – возмущение

Как показали исследования преобразований, осуществляемых в нечетких регуляторах [4, 8], все они являются по существу нелинейными и именно этим объясняется улучшение качества управления в САУ с нечеткими регуляторами: в процессе отработки задающего воздействия меняется значение коэффициента усиления НПР (Рис. 2).



а б

Рис. 2. Зависимость показателей качества переходного процесса (б)
от вида нелинейной характеристики НПР (а)

Параметры нелинейной характеристики НПР зависят от нескольких факторов: размерности терм-множеств лингвистических переменных, формы и относительного размещения функций принадлежности отдельных термов, порядка взаимосвязей входных и выходных термов. Варьируя вышеперечисленные факторы с учетомвлияния параметров нелинейной характеристики НПР на динамику системы, авторами была разработана обобщенная методика формирования нелинейного преобразования НПР[6, 7].

Учитывая нелинейный характер преобразования *U(ε)*в НПР, возникает необходимость исследования динамики системы и в первую очередь устойчивости. Очевидно, что для решения данной задачи можно применить модифицированные методы исследования нелинейных систем, например аналог критерия абсолютной устойчивости А.М. Попова и метод гармонического баланса.

По критерию В.М. Попова, условие устойчивости положения равновесия имеет вид:

$$\mathrm{Re}[1+jq''\omega]''\, W_{1}OУ\,(j\omega)+1/k>0 \quad , \qquad (1)$$

где c- действительное число (положительное или отрицательное), $W_{OУ}(j\omega)$ – частотная характеристика ОУ, k – угловой коэффициент луча, ограничивающего сектор, внутри которого лежат нелинейные характеристики U(ε). Однако особенность вида нелинейного преобразования НПР, а именно наличие точки (точек) перелома в нем, приводит к необходимости применения критерия абсолютной устойчивости процессов, который (с учетом Рис.2)можно записать в виде:

(2)

где k_2 – угловой коэффициент крутого участка нелинейной характеристики U(ε). Графическая интерпретация условия (2) представлена на Рис. 3, где , при $K_{OУ}=50$, $T_1=0,002$, $T_2=0,05$.

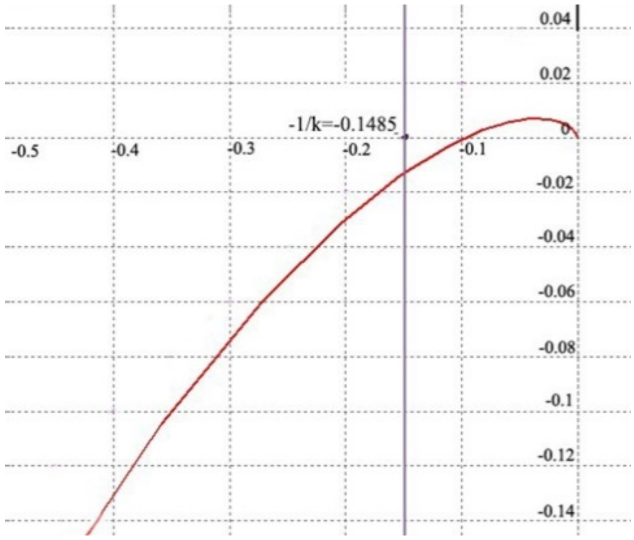


Рис. 3. Графоаналитическая интерпретация условия абсолютной устойчивостипроцессов САУ с нечетким П-регулятором

Как видно условие (2) нарушается. Несложно показать, что условие (1) для этой же системы будет выполняться. Сравнение условий (1) и (2) показывает, что критерий абсолютной устойчивости процессов является более «жестким» и именно его необходимо использовать при анализе и синтезе параметров НПР. Однако стоит обратить внимания с одной стороны, на то, что условия (1) и (2) носят достаточный характер, что затрудняет достоверную оценку области устойчивости на их основе, а с другой стороны, на то, что более «жесткие» требования к условию (2) в большинстве случаев приводят к его невыполнению, что приводит к применения альтернативных подходов к анализу САУ с НПР, одним из которых является метод гармонического баланса [6, 9].

Комплексный коэффициент усиления нелинейного элемента $\mathbf{W_{НПР}(A)}$ (аналогичного представленным на рис. 2) можно записать в следующем виде:

$$W_{НПР}(A)=\frac{2}{\pi}\left[(k_1-k_2)\arcsin\frac{a}{A}+k_2\arcsin\frac{b}{A}+\frac{2k_2a+2c-k_2b}{A}\sqrt{1-\left(\frac{b}{A}\right)^2}-\frac{k_2a+k_1a}{A}\sqrt{1-\left(\frac{a}{A}\right)^2}\right],$$

$$k_1=\frac{d}{a},k_2=\frac{c-d}{b-a} \tag{3}$$

где A – амплитуда входного сигнала; k1 и k2 – углы наклона 1-й и 2-й части нелинейной

$\mathbf{k_2 > k}$

характеристики U(ε); ; (a,d) и (b,c) – координаты точек перегиба нелинейной характеристики U(ε).

Решение уравнения гармонического баланса сводится к определению точек пересечения характеристик $\mathbf{-W_{НПР}^{-1}(A)}$ и $\mathbf{W_{ОУ}(j\omega)}$, графоаналитическая интерпретация которого представлена на рис.4 (для того же примера, что и на Рис.3).

Из Рис.4 видно, что колебаний в системе нет. Стоит заметить, что значения, определяющие границу области отсутствия колебаний, ближе к значениям параметров, определяющих область абсолютной устойчивости процессов, нежели к значениям, определяющим область абсолютной устойчивости положения равновесия (Рис. 3), что позволяет говорить о методе гармонического баланса как более точном (естественно, при порядке объекта управления не менее третьего). Более того, на его основе можно получить косвенную оценку качества, используясь методики, представленные в работах [9, 10].

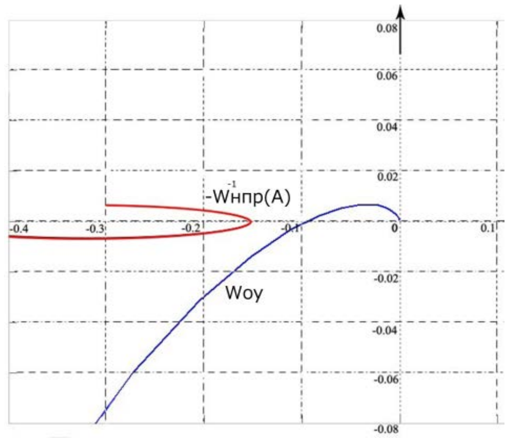


Рис. 4. Графоаналитическое решение уравнения гармонического баланса
САУ с нечетким П – регулятором

Рассмотрим, косвенную оценку качества САУ с НПР в графоаналитическом виде. Итак, на Рис. 4 представлен эквивалентный комплексный коэффициент усиления НПР$-W_{НПР}^{-1}$, полученный из соотношения (3) для нелинейного преобразования вида Рис. 2а. Тогда согласно [9]на Рис. 6а построено семейство кривых, соответствующих различным показателям колебательности САУ с НПР (Рис. 5), где с – показатель колебательности (при с=1,1 σ=10%, при с=1,2 σ=20%, при с=1,3 σ=30%).На Рис.6б представлен переходной процесс в соответствующей систем.

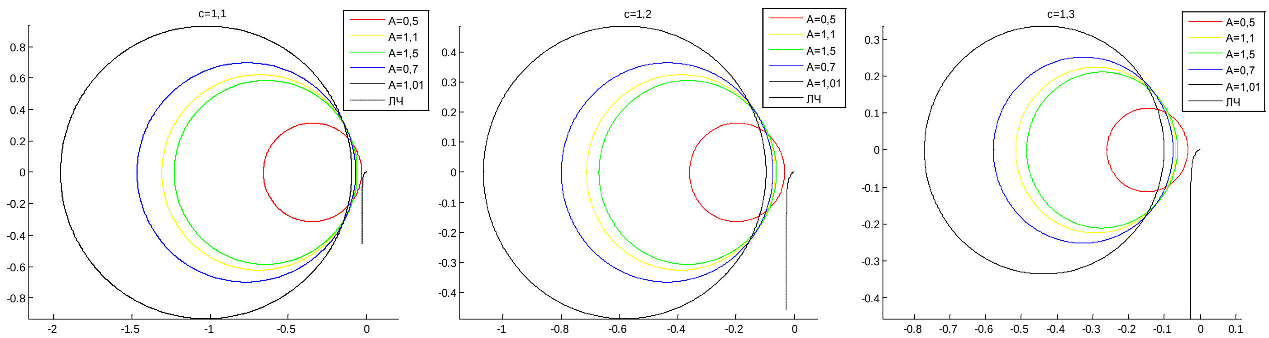
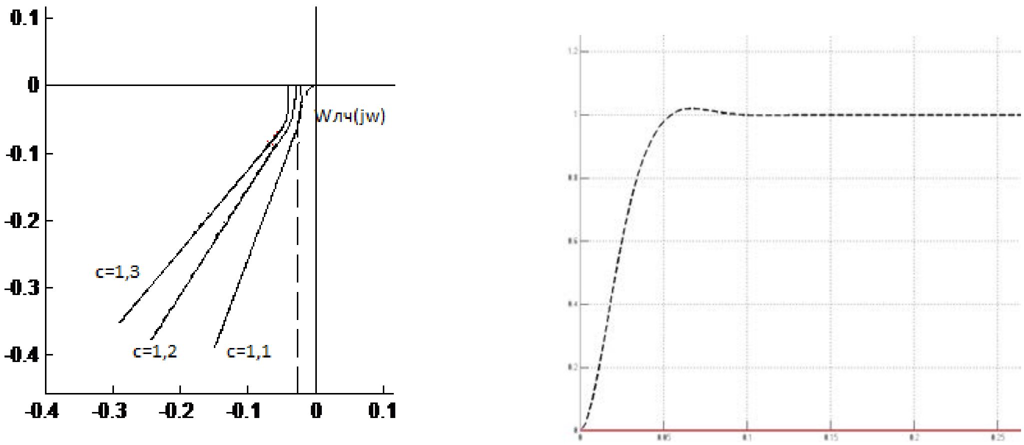


Рис. 5. Показатели колебательности САУ с нечетким П-регулятором



а б

Рис. 6. Семейство кривых, соответствующих различным показателям колебательности (а)
и переходной процесс соответствующей системы (б)

Косвенная оценка показателя колебательности (и, соответственно, перерегулирования) осуществляется при касании годографа линейной части $W_{ЛЧ}(j\omega)$ с одной из кривых на рис. 6а. Меняя параметры нелинейного преобразования (коэффициента наклона k1 и k2 и точку перегиба Δ) можно менять $-W_{НПР}^{-1}$, соответственно кривые на рис.6а, а следовательно и перерегулирования в системе.

Таким образом, полученная графоаналитическая методика косвенной оценки качества на основе метода гармонического баланса является достаточноточной и удобной для анализа САУ с НПРи представляется вполне конструктивным инструментом синтеза нелинейного преобразования в нечетком регуляторе.

Для определения вектора направления последующих исследований стоит отметить некоторые недостатки данного подхода. Во-первых, метод гармонического баланса применим для систем не ниже третьего порядка; данное условие определяется необходимостью выполнения гипотезы фильтра. Во-вторых, метод гармонического баланса не дает оценки об области устойчивости системы, хотя, как показано в данной работе значения, определяющие области устойчивости и значения, определяющие наличие колебаний, достаточно близки.

Вполне очевидно, что, развивая известные в теории нелинейных САУ методики повышения точности метода гармонического баланса, можно полученный результат модифицировать для нечетких ПИ – и ПД – регуляторов.

11. A Piegat. Fuzzy modeling and control, PhysicaVerlag Heidelberg, 728 p. 2001.
12. Bing-Fei Wu, Li-Shan Ma, Jau-WoeiPerng, Hung-I Chin, Absolute stability analysis in uncertain static fuzzy control systems with the parametric robust Popov criterion.:Fuzzy Systems, FUZZ-IEEE 2008. (IEEE World Congress on Computational Intelligence). IEEE International Conference on, pp. 1325 – 1330, 2008.
13. Интеллектуальные системы автоматического управления./ Под ред. И.М. Макарова, В.М. Лохина. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. – 576с.
14. Искусственный интеллект и интеллектуальные системы управления/ И.М. Макаров, В.М. Лохин, С.В. Манько, М.П. Романов; [отв. ред. И.М. Макарова]; Отделение информ. технологий и вычислит.систем РАН. – М.: Наука, 2006. – 333 с.
15. Автоматизация синтеза и обучение интеллектуальных систем управления/отв. ред. И.М. Макаров, В.М. Лохин; Отд-иеинформ. технологий и вычисл. систем РАН. – М.: Наука, 2009. – 228 с.
16. N. Kazachek, V. Lokhin, V. Ryabcov. Integrated dynamics research of control systems with fuzzy P–controller. 2015 3rd InternationalConferenceonIntelligent Mechatronics and Automation-ICIMA 2015
17. Научно-технический отчет по годовому этапу научно-исследовательской работы № 784 в рамках базовой части государственного задания в сфере научной деятельности по Заданию № 2014/112 за 2014 год
18. Макаров И.М., Лохин В.М.. Интеллектуальные системы автоматического управления. – М.: Физматлит, 2001, 576с.
19. Теория автоматического управления Под ред А.В Нетушила Учебник для вузов Изд 2-е babпереработ и доп.-М.: Высшая школа, 1976-280 с., 1983 - 432 с
20. A. Beléndez, A. Hernández, T. Beléndez, M.L. Álvarez, S. Gallego, M. Ortuño, C. Neipp, Application of the harmonic balance method to a nonlinear oscillator typified by a mass attached to a stretched wire, Journal of Sound and Vibration, Vol. 302, Iss. 4-5, 2007

D. Yukhimets, V. Filaretov

THE SYNTHESIS OF PATH CONTROL SYSTEM FOR AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE

Institute of automation and control processes FEB RAS, Vladivostok, Russia
filaret@iacp.dvo.ru, yukhimets.da@dvfu.ru

Д.А. Юхимец, В.Ф. Филаретов

СИНТЕЗ СИСТЕМЫ КОНТУРНОГО УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ АВТОНОМНОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА*

Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Дальневосточный Федеральный университет, г. Владивосток,
filaret@iacp.dvo.ru, yukhimets.da@dvfu.ru

1. Введение

АНПА являются сложными нелинейными динамическими объектами с переменными и неопределенными параметрами, функционирующими в условиях существенных взаимовлияний между их степенями свободы при наличии внешних возмущений [1, 2]. Эти негативные особенности особенно

* Работа поддержана Научным фондом ДВФУ (соглашение 13-06-0112-м_а)

сильно проявляются в процессе движения АНПА по сложным пространственным траекториям с высокими скоростями, когда происходит одновременное управление по нескольким степеням их свободы.

Для реализации высокоточного управления движением таких АНПА уже разработано большое количество робастных и адаптивных СУ, которые позволяют компенсировать неопределенность и переменность их параметров, а также внешних воздействий. К таким СУ относятся системы с переменной структурой [3] и с эталонными моделями [4], которые за счет использования релейных сигналов управления позволяют придать АНПА желаемые динамические свойства. При этом, несмотря на простоту реализации и высокую степень робастности к изменяющимся параметрам и внешним возмущениям, указанные СУ обладают существенным недостатком, заключающимся в том, что для их качественной реализации на бортовых компьютерах АНПА необходимо обеспечивать высокую частоту (сотни Герц) выработки управляющих воздействий, что не всегда возможно.

Другим традиционным типом СУ, позволяющим обеспечивать высококачественное управление АНПА, являются адаптивные СУ, в которых подстройка их параметров в процессе работы происходит на основе идентификации параметров АНПА и внешних воздействий на них. Эти СУ описаны в работе [5]. Однако поскольку АНПА являются нелинейными, многомерными и многосвязными объектами, то алгоритмы идентификации их параметров обладают большой вычислительной сложностью и часто не могут быть реализованы на бортовых компьютерах.

Таким образом, в процессе разработки ИИУС АНПА возникает необходимость использования простых в реализации СУ, которые позволяли бы обеспечить точное движение АНПА по заданным пространственным траекториям в условиях переменности и неопределенности их параметров. Для точного управления движением АНПА по пространственным траекториям предлагается использовать СУ нового типа [6], состоящие из двух совместно действующих контуров управления. Первый контур содержит простую линейную СУ, обеспечивающую устойчивую отработку программных сигналов движения АНПА, задающих движение целевой точки по заданной пространственной траектории с желаемой скоростью, а второй содержит систему коррекции положения этой программной точки, формирующую дополнительные сигналы управления, обеспечивающие компенсацию внешних воздействий и переменных параметров АНПА.

Однако, исследования показали, что использование регулятора положения программной точки, предложенного в работе [6], может приводить к появлению колебательности в движениях АНПА, поэтому в данном разделе решается задача разработки СУ, основанной на принципах, описанных в работах [6], но лишенных отмеченных недостатков, снижающих качество движения АНПА по заданным траекториям.

2. Описание математической модели АНПА и постановка задачи

Наиболее полная динамическая модель пространственного движения АНПА представляет собой систему из шести нелинейных дифференциальных уравнений с переменными параметрами, записанными в СК, связанной с корпусом АНПА [1]. Эти уравнения учитывают перекрестные связи и взаимовлияния между всеми его степенями свободы, а также гидродинамические и гидростатические силы и моменты, действующие на АНПА со стороны окружающей вязкой среды. В матричном виде эта модель имеет вид [1]:

$$\mathbf{M}\dot{\boldsymbol{\upsilon}} + (\mathbf{C}(\boldsymbol{\upsilon}) + \mathbf{D}(\boldsymbol{\upsilon}))\boldsymbol{\upsilon} + \mathbf{g}(\mathbf{x}) = \tau , \quad (1)$$

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{J}(\mathbf{x})\boldsymbol{\upsilon} , \quad (2)$$

где $\mathbf{M} \in \mathbf{R}^{6\times6}$ – матрица инерции АНПА (включающая присоединенные массы и моменты инерции жидкости); $\mathbf{C}(\boldsymbol{\upsilon}) \in \mathbf{R}^{6\times6}$ – матрица кориолисовых и центробежных сил; $\mathbf{D}(\boldsymbol{\upsilon}) \in \mathbf{R}^{6\times6}$ – матрица гидродинамических сил и моментов; $\mathbf{g}(\mathbf{x}) = [F_{гсx}, F_{гсy}, F_{гсz}, M_{гсx}, M_{гсy}, M_{гсz}] \in \mathbf{R}^6$ – вектор гидростатических сил и моментов; $\mathbf{x} = [x, y, z, \varphi, \theta, \psi]^T \in \mathbf{R}^6$ – вектор положения и ориентации АНПА в абсолютной СК (АСК); φ, θ, ψ – углы крена, дифферента и курса АНПА, соответственно; $\boldsymbol{\tau} = [\tau_{дx}, \tau_{дy}, \tau_{дz}, M_{дx}, M_{дy}, M_{дz}]^T \in \mathbf{R}^6$ – вектор проекций упоров и моментов движителей АНПА на оси связанной с ним СК; $\boldsymbol{\upsilon} = [\upsilon_x, \upsilon_y, \upsilon_z, \omega_x, \omega_y, \omega_z]^T \in \mathbf{R}^6$ – вектор проекций линейной и угловой скоростей движения АНПА на оси связанной с ним СК.

Уравнения (1) – (2) описывают движения АНПА в водной среде как свободного твердого тела по всем шести степеням свободы с учетом взаимовлияний между всеми каналами управления.

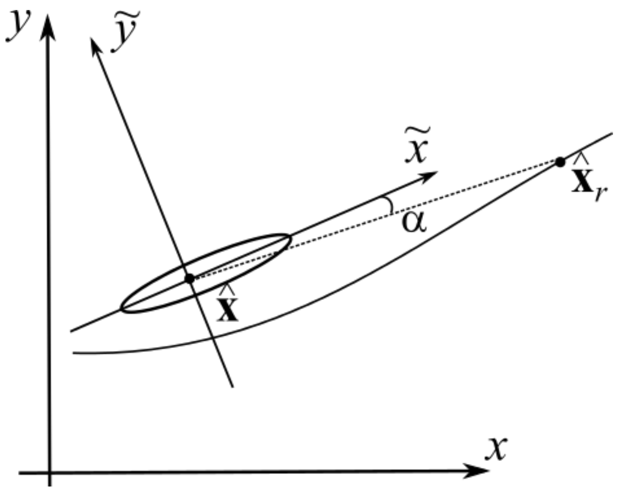


Рис. 1. Движение АНПА с СУ (2.7) в горизонтальной плоскости

При синтезе СУ АНПА будем полагать, что в процессе движения АНПА все время ориентируется на программную точку $\mathbf{x}_r$, движущуюся по заданной траектории, для уменьшения гидродинамического сопротивления (см. Рис. 1). Этот режим движения наиболее характерен для подавляющего большинства типов АНПА.

Ранее в работе [6] в качестве регулятора положения программной точки $\mathbf{x}_r$ было предложено использовать П-регулятор, работающий согласно выражению:

$$\begin{gathered}\Delta\boldsymbol{\varepsilon} = K_n \boldsymbol{\varepsilon}_n, \\ \boldsymbol{\tau} = \mathbf{J}^T(\mathbf{x})\mathbf{K}_p((\mathbf{x}_r + \Delta\boldsymbol{\varepsilon}) - \mathbf{x}),\end{gathered} \tag{3}$$

где $\boldsymbol{\varepsilon}_n = (\varepsilon_{nx}, \varepsilon_{ny}, \varepsilon_{nz})^T$ – вектор отклонения АНПА от заданной траектории в АСК; $\Delta\boldsymbol{\varepsilon}$ – вектор смещения программной точки $\mathbf{x}_r$ в АСК; где $\mathbf{x}_r = (x_r, y_r, z_r, \varphi_r, \theta_r, \psi_r)^T$ – вектор желаемого положения и ориентации АНПА в АСК; $\mathbf{K}_p = diag(K_{p1}, K_{p2}, K_{p3}, K_{p4}, K_{p5}, K_{p6})$ – матрица положительных коэффициентов.

Исследования показали, что СУ (3) обладает высокой эффективностью и позволяет в несколько раз уменьшить отклонение АНПА от заданной траектории его движения при использовании простейших линейных регуляторов в основном контуре управления. Однако появляющиеся колебания АНПА относительно траекторий их движения при увеличении коэффициента K_n не позволяют точно выполнять некоторые операций вблизи объектов работ. Поэтому в качестве регулятора положения программной точки АНПА реализовать другой регулятор, устраняющий указанные недостатки.

3. Анализ ПД-регулятора положения программной точки АНПА

Для устранения описанного выше недостатка вместо П - регулятора положения программной точки целесообразно использовать ПД - регулятор, дифференцирующая составляющая которого способна погасить возникающие колебания, а его реализация относительно проста. Этот регулятор описывается выражениями:

$$\begin{gathered}\Delta\boldsymbol{\varepsilon} = K_{np}\boldsymbol{\varepsilon}_n + K_{nd}\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_n, \\ \boldsymbol{\tau} = \mathbf{J}^T(\mathbf{x})\mathbf{K}_p((\mathbf{x}_r + \Delta\boldsymbol{\varepsilon}) - \mathbf{x}),\end{gathered} \tag{4}$$

где K_{np}, K_{nd} – положительные коэффициенты.

Исследуем закон управления (4), используя следующие предположения. Поскольку между величиной $\boldsymbol{\varepsilon}_n$ отклонения АНПА от траектории и ошибкой $\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{x}_r - \mathbf{x}$ слежения СУ АНПА существует соотношение $\|\boldsymbol{\varepsilon}_n\| \le \|\boldsymbol{\varepsilon}\|$, то в законе (4) вместо $\boldsymbol{\varepsilon}_n$ можно использовать ε. С учетом этого закон управления (4) можно переписать виде:

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{J}^T(\mathbf{x})\mathbf{K}_P((K_{np}+1)\boldsymbol{\varepsilon} + K_{nd}\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}). \quad (5)$$

Для анализа эффективности закона управления (5) используем метод исследования устойчивости Ляпунова, вводя функцию Ляпунова вида [1]:

$$V = \frac{1}{2}\mathbf{x}^T\mathbf{K}_R\mathbf{x} + \frac{1}{2}\boldsymbol{\upsilon}^T\mathbf{M}\boldsymbol{\upsilon}, \quad (6)$$

где $\mathbf{K}_R = \mathbf{K}_P(K_{np}+1)$ – диагональная матрица положительных коэффициентов.

Производная этой функции в силу условий $\dot{\mathbf{M}} = 0$ и $\mathbf{M} = \mathbf{M}^T > 0$, а также уравнения (2) будет иметь вид:

$$\dot{V} = \mathbf{x}^T\mathbf{K}_R\dot{\mathbf{x}} + \boldsymbol{\upsilon}^T\mathbf{M}\dot{\boldsymbol{\upsilon}} = \boldsymbol{\upsilon}^T(\mathbf{M}\dot{\boldsymbol{\upsilon}} + \mathbf{J}^T(\mathbf{x})\mathbf{K}_R\mathbf{x}). \quad (7)$$

Подставив в выражение (7) выражение (1) получим:

$$\dot{V} = \boldsymbol{\upsilon}^T(\boldsymbol{\tau} - \mathbf{C}(\boldsymbol{\upsilon})\boldsymbol{\upsilon} - \mathbf{D}(\boldsymbol{\upsilon})\boldsymbol{\upsilon} + \mathbf{J}^T(\mathbf{x})\mathbf{K}_R\mathbf{x}). \quad (8)$$

Подставив в (8) закон управления (5) и учитывая, что $\boldsymbol{\upsilon}^T\mathbf{C}(\boldsymbol{\upsilon})\boldsymbol{\upsilon} \equiv 0$ и $\boldsymbol{\upsilon}^T\mathbf{D}(\boldsymbol{\upsilon})\boldsymbol{\upsilon} > 0$ [1], получим:

$$\begin{aligned}\dot{V} = \boldsymbol{\upsilon}^T(-\mathbf{J}^T(\mathbf{x})\mathbf{K}_R\mathbf{x} - \mathbf{J}^T(\mathbf{x})\mathbf{K}_pK_{nd}\dot{\mathbf{x}} - \mathbf{C}(\boldsymbol{\upsilon})\boldsymbol{\upsilon} - \mathbf{D}(\boldsymbol{\upsilon})\boldsymbol{\upsilon} + \mathbf{J}^T(\mathbf{x})\mathbf{K}_R\mathbf{x}) = \\ = -\boldsymbol{\upsilon}^T(\mathbf{K}_pK_{nd} + \mathbf{D}(\boldsymbol{\upsilon}))\boldsymbol{\upsilon} < 0.\end{aligned} \quad (9)$$

Из выражения (9) следует, что использование закона управления (4) позволяет обеспечить устойчивость работы всей СУ в целом при условии выбора положительных коэффициентов регулятора (4). При этом добавление дифференцирующей составляющей в закон управления (4), как будет показано далее, позволяет улучшить качество переходных процессов при движении АНПА и исключить негативную колебательность. Но при реализации закона управления (4) следует использовать следующие рекомендации.

1) Модуль вектора $\Delta\boldsymbol{\varepsilon}$ смещения программной точки не должен превышать задаваемой величины $\Delta\varepsilon_{\max}$:

$$\Delta\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{cases} K_{np}\boldsymbol{\varepsilon}_n + K_{nd}\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_n, \textit{если} \parallel K_{np}\boldsymbol{\varepsilon}_n + K_{nd}\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_n \parallel < \Delta\varepsilon_{\max} \\ \dfrac{(K_{np}\boldsymbol{\varepsilon}_n + K_{nd}\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_n)\Delta\varepsilon_{\max}}{\parallel K_{np}\boldsymbol{\varepsilon}_n + K_{nd}\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_n \parallel}, \textit{если} \parallel K_{np}\boldsymbol{\varepsilon}_n + K_{nd}\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_n \parallel \geq \Delta\varepsilon_{\max} \end{cases}. \quad (10)$$

Условие (10) позволяет исключить ошибки начального движения АНПА, когда требуется осуществить подход к заданной траектории. При этом величина $\Delta\varepsilon_{\max}$ должна быть в два раза меньше, чем модуль допустимой динамической ошибки движения АНПА.

2) Вместо угла α для формирования момента M_z можно использовать величину $\tilde{\varepsilon}_y$. Это обусловлено тем, что знаки ошибки по углу α и величины $\tilde{\varepsilon}_y$ совпадают (см. рисунок 1), а при $\tilde{\varepsilon}_y \to 0$ и $\alpha \to 0$. Кроме того, при движении по заданной траектории, когда угол α мал, справедливо условие:

$$\alpha \approx \sin(\alpha) \sim \tilde{\varepsilon}_y = \parallel \tilde{\boldsymbol{\varepsilon}} \parallel \sin(\alpha). \quad (11)$$

Использование выражения (11) позволяет существенно упростить реализацию закона управления (4), что особенно актуально для бортовых компьютеров, имеющих малую производительность. Основными достоинствами закона управления (4) являются:

1) Возможность выбора больших коэффициентов K_{np}, которые обеспечивают большую точность движения АНПА по задаваемым траекториями, по сравнению с законом управления, предложенным в работе [6]. При этом увеличение точности движения АНПА по траектории не приведет к появлению нежелательной колебательности.

2) Возможность автоматической компенсации неизвестных подводных течений, что сложно

реализуемо в традиционных следящих СУ движением АНПА.

3) Точные движения АНПА по задаваемым траекториям обеспечиваются коэффициентами усиления его регуляторов в десятки раз меньшими, чем в традиционных СУ, обеспечивающих сравнимую точность движения. Это особенно важно при низкой частоте формировании бортовыми СУ сигналов управления АНПА, когда большие коэффициенты усиления могут сделать указанную СУ неустойчивой.

4. Исследование работы предложенной системы управления АНПА

Для проверки качества работы предложенной СУ АНПА было проведено математическое моделирование. В процессе моделирования использовалась полная математическая модель АНПА, описываемая уравнениями (1)-(2), параметры которой имели следующие значения:

$m_a = 300кг$; $Y_c = 0.05м$; $J_{xx} = 9кг\cdot м^2$, $J_{yy} = 30кг\cdot м^2$, $J_{zz} = 30кг\cdot м^2$; $\lambda_{11} = 80кг$, $\lambda_{22} = 140кг$, $\lambda_{33} = 140кг$, $\lambda_{44} = 5кг\cdot м^2$, $\lambda_{55} = 30кг\cdot м^2$, $\lambda_{66} = 30кг\cdot м^2$, $\lambda_{ij} = 0,\ i \neq j, i, j = \overline{(1,6)}$; $d_{1x} = 30\ кг\cdot c^{-1}$, $d_{2x} = 10\ кг\cdot м^{-1}$, $d_{1y} = 60\ кг\cdot c^{-1}$, $d_{2y} = 30\ кг\cdot м^{-1}$, $d_{1z} = 60\ кг\cdot c^{-1}$, $d_{2z} = 30\ кг\cdot м^{-1}$, $d'_{1x} = 20\ Нмс$, $d'_{2x} = 10\ Нмс^2$, $d'_{1y} = 40\ Нмс$, $d'_{2y} = 20\ Нмс^2$, $d'_{1z} = 40\ Нмс$, $d'_{2z} = 20\ Нмс^2$;

В процессе моделирования исследовалось движение АНПА по траектории, расположенной в горизонтальной плоскости и описываемой выражениями:

$$x_r(t) = 40\cos(0.025t - \pi) + 40,\ y_r(t) = 30\sin(0.025t)\ . \tag{12}$$

Программная скорость движения по траектории (12) менялась в пределах от 0.75 до 1 м/с. При этом максимально возможная скорость движения АНПА, которую мог обеспечить его движительный комплекс, составляла 1.6 м/с.

При этом исследовалось и сравнивалось качество работы трех СУ:

1) традиционной СУ, описываемой выражениями (3), когда $\mathbf{K}_P = diag(25{,}0{,}5)$ и $K_n = 0$;

2) СУ с П – регулятором, формирующим положение программной точки и описываемым выражениями (3), когда $\mathbf{K}_P = diag(25{,}0{,}5)$, $K_n = 20$;

3) СУ с ПД - регулятором, формирующим положение программной точки и описываемым выражениями (4), когда $\mathbf{K}_P = diag(25{,}0{,}5)$, $K_{np} = 20, K_{nd} = 80$.

Отметим, что при указанные СУ имеют три канала управления: по координатам *x*, y и углу курса ψ, а движительный комплекс АНПА не имеет возможности формировать силы тяги вдоль оси $\tilde{y}$ связанной СК. Эта конфигурация характерна для большинства АНПА.

Результаты моделирования движения АНПА по траектории, задаваемой выражениями (12) представлены на рисунке 2. Здесь на рисунке 12а точечной черной линией обозначена траектория, движения программной точки $\mathbf{x}_r$ (см. выражение 12), пунктирной серой линией – траектория движения АНПА с традиционной СУ, сплошной черной линией – траектория движения АНПА с СУ (3), а сплошной серой линией – траектория движения АНПА с СУ (4). А на рисунке 12б показаны величины соответствующих отклонений АНПА от заданной траектории: сплошная серая линия - обозначено отклонение АНПА от траектории (12) при использовании традиционной СУ, точечной черной линией – отклонение от этой траектории при использовании СУ (3), а сплошной черной линией – при использовании СУ (4).

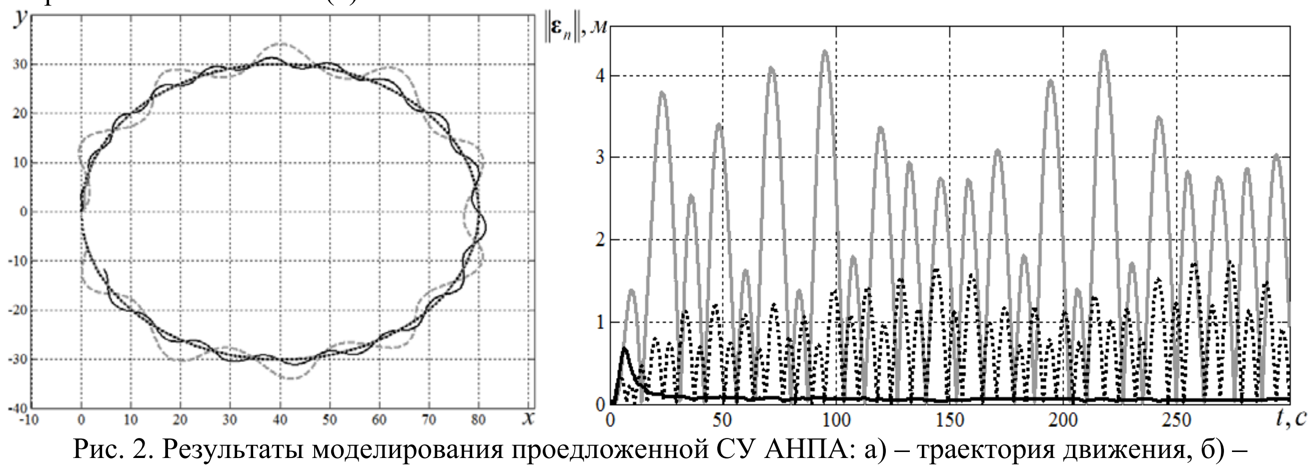


Рис. 2. Результаты моделирования проедложенной СУ АНПА: а) – траектория движения, б) – отклонения АНПА от заданной траектории

Из представленных рисунков видно, что при использовании традиционной СУ, настроенной на работу в режиме обхода последовательности заданных точек, и движении АНПА по траектории (12), появляются отклонения от этой траектории, превышающие 4 м, что является неприемлемым для выполнения большинства операций. При включении дополнительного П-регулятора (3), корректирующего положение программной точки, амплитуда отклонений уменьшается более чем в два раза, но колебательный характер движения АНПА при этом сохраняется. И только использование предложенного ПД-регулятора (4), корректирующего положение программной точки, позволяет не только полностью исключить колебания АНПА при его движении по заданной траектории, но и обеспечить величину отклонения от этой траектории не более 0.12 м.

При этом следует отметить, что аналогичные результаты получены при наличии течений, а также при изменении параметров АНПА. Это говорит о высокой эффективности предложенной СУ.

Заключение

В работе предложен метод синтеза простых для реализации СУ АНПА, но обеспечивающих высокую динамическую точность управления движением АНПА по заданным сложным траекториям. Результаты математического моделирования, полностью подтвердили эффективность предложенного подхода к управлению движением АНПА в условиях неопределенности и переменности их параметров, а также при наличии внешних возмущений.

1. Fossen T.I. Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control, - Wiey&Sons Ltd., 2011. – 575 p.
2. Автономные подводные роботы: системы и технологии/ под ред. М.Д. Агеева. – М.: Наука, 2005. – 398 с.
3. Лебедев А.В., Филаретов В.Ф. Синтез многоканальной системы с переменной структурой для управления пространственным движением подводного аппарата // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2005. – №3. – С. 170-176.
4. Лебедев А.В., Филаретов В.Ф., Стаценко О.М. Многоканальная самонастраивающаяся система централизованного управления движением подводного робота // Мехатроника. – 2001. – №9. – С.41-45.
5. Sun Y.C., Cheah C.C. Adaptive control schemes for autonomous underwater vehicle // Robotica. – 2008. – Vol. 27. – P. 119-129.
6. Филаретов В.Ф., Юхимец Д.А. Способ формирования программного управления скоростным режимом движения подводных аппаратов по произвольным пространственным траекториям с заданной динамической точностью // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2011. – № 4. – С.167-176.

V.Ya. Vilisov

LEARNING MOBILE ROBOT BASED ON ADAPTIVE CONTROLLED MARKOV CHAINS

IT-Energy, Korolev, Moscow region
vvib@yandex.ru

Herein we suggest a mobile robot-training algorithm that is based on the preference approximation of the decision taker who controls the robot, which in its turn is managed by the Markov chain. Set-up of the model parameters is made on the basis of the data referring to the situations and decisions involving the decision taker. The model that adapts to the decision taker's preferences can be set up either a priori, during the process of the robot's normal operation, or during specially planned testing sessions. Basing on the simulation modelling data of the robot's operation process and on the decision taker's robot control we have set up the model parameters thus illustrating both working capacity of all algorithm components and adaptation effectiveness.

Introduction

There are many ways to increase the effectiveness of the robotic system (RS). Thus, we either can provide a high effectiveness of the sensor systems (SS) and/or maximum possible independence of the RS.

Within the framework of the first method, it is possible to increase the informativeness and a number of data collection channels. However, it may also require increasing the productivity of the on-board computer. SS effectiveness can also be increased by using effective algorithms for data processing that are received from them (for example, we can do it by applying different filtration models: Kalman filtration, Bayesian filtration, *POMDP* etc., as well as using an effective solution of *SLAM* problem etc.). Within the first approach, the task of one of the problems is *to discover the structure and composition of the SS that would possess a minimum sufficiency for the performance of RS's tasks*.

The second approach is closely related to the necessity of providing a special behavior of the RS that would correspond to the objectives and preferences of the decision taker that controls the RS. This direction is closely related to the research undergone in the field of training RS to behave adequately and to interconnect more effectively with the decision taker [1, 2, 3]. Here we make a good use of the Bayesian education tools and Markov processes including *POMDP*.

The solutions that were obtained when implementing these approaches quite often can complement and/or compensate each other's disadvantages.

The purpose of this work is to solve the problem of selecting the minimum composition of SS that would be sufficient for RS to execute tasks independently. However, due to the limited size of the article, the work concentrates only on teaching independent mobile robots (IMR) preferences of the decision taker and estimating effectiveness of the task performance within the selected configuration of the SS. As an RS we take an IMR possessing two contact (or other functionally similar) sensors and a pair of driving wheels. The task of the robotic system lies in scanning some area (room, territory etc.). Typical example of such IMR is a robotic vacuum cleaner (RVC) or a robotic lawn mower. RS can perform this task by scanning the room using one of the stored programs that is chosen by the decision taker. At that, the effectiveness of the task performance shall vary according to the program selection. It depends on both the program and the room's shape. The logic of the RS is the following: by using different behavior modes applied for similar situations (activation of specific sensors), it makes different decisions. For example, when the left sensor is activated, the RS shall decide to move back taking a right turn etc. In order to simplify the presentation of this work's materials we shall consider the simplest variant of IMR containing two sensors (states) and two decisions (variant actions). In particular, the sensor area is presented by two front (left and right) crash/proximity transducers with the two actions/decisions being the crash reactions (states). The decisions take form of moving back by turning left and moving back by turning right. The increase of the multitude of states and decisions will boost up the variety and effectiveness of IMR behavior not influencing in any way the content of the suggested algorithm. All main mathematical constructions shall be performed for the case with two states and two decisions.

This class of problems is often solved with discrete Markov Decisions Processes (MDP). The suggested algorithm of adapting RS to the objective preferences of the decision taker is founded on the reverse problem for the Markov payoff chain (RPMDP). The problem to be studied here observes effective actions of the decision taker thus computing the estimate of the payoff/objective function of MDP. Therefore, when solving a direct problem for MDP (DPMDP), the optimal controls shall be adapted to the objective preferences of the decision taker.

Markov Models Applied in RS Management

Markov payoff chains or *Markov profit chains*, which are also called *controlled Markov chains* are the developments of Markov chains, whose description is complemented with the control element, i.e. the decision of the decision taker made when locating Markov chain in one of its states. The decision is presented as a multitude of alternatives and their corresponding multitude of transition probability matrices.

A large group is comprised by the *Partially Observable Markov Decisions Processes (POMDP)*. In comparison with *MDP* its additional element is the multitude of dimensions. These models contain all components that are inherent to the traditional models of dynamic controlled systems [12], which, in their turn, contain equations of process/system, control and dimensions. This presentation allows us to solve three main groups of management problems: filtration, identification and optimal control.

When using *MDP* in RS management problems [5, 6, 7, 8, 9], we consider payoff functions (PF) be known and a priori set up when the system or controlling algorithms were developed. Structure and parameters of PF influence the specific value of the optimal decision. If PF does not correspond to the value hierarchy and preference system of the decision taker that controls the RS, the computed solution shall be optimal for the specific PF at the same time being non-optimal for the objective preferences of the decision taker. Therefore, the optimal controlled influence that is obtained by any method is optimal to the PF.

MDP is considered to be set up if we know its such elements as *multitude of states* $i = \overline{1,m}$, *start state probability vector* $\bar{p}_0 = \|p_i\|_m$, *multitude* of solutions $k = \overline{1,K}$, *one-step process transition conditional probability matrix* $P^k = \left\|p_{ij}^k\right\|_{mm}^K$, *one-step conditional payoff matrix* $R^k = \left\|r_{ij}^k\right\|_{mm}^K$. The solution of *MDP* is the optimal strategy f^* being one out of many S -strategies. The random strategy that possesses $s = \overline{1,S}$ index can be presented as the following column vector: $f^s = [k_1^s \quad k_2^s \quad \cdots \quad k_m^s]^T$. Here T is the conjugation symbol. Hereinafter we shall record column vector as a conjugated row vector for the purposes of compactedness. Optimal strategy provides a maximum of one-step accumulated or mean profits/payoffs. Within the strategy structure, k_i^s is the decision that should be made according to s -strategy should the process at the current stage n is in state i. The structure of the specific strategy that is applied for usage (decision making) within the current presentation leads to the fact that instead of the multitude of P^k and R^k matrices we shall see the generation of single working matrices, correspondingly P^s and R^s.

Solution of Direct Problem *MDP (DPMDP)*

When solving *MDP* we usually apply [10, 11] a recurrent algorithm based on the principle of Richard Bellman or iteration algorithm of Ronald Howard [11] that allows to improve the solution stepwise. Should the spaces of states and solutions be not large, the optimal solution of the problem may be found with the brute-force search for strategies. We used brute-force search method for the model calculations below.

Brute-Force Search for Strategies suggests comparing the competing strategies using the value of *one-step mean payoff* that is existing within the steady-state conditions. The search is performed within the class of stationary strategies. Let us define mean payoff value calculated for one step of V^s for the random s -strategy within the steady-state conditions. Let us construct P^s and R^s work matrices for the s -strategy. They are formed from the original transition matrices where we use a specific strategy configuration $f^s = [k_1^s \quad k_2^s \quad \cdots \quad k_m^s]^T$ as the key. Thus, the first row of P^s is moved from the first row of $P^{k_1^s}$ matrix, the second row is moved from the second row of $P^{k_2^s}$ matrix and so on. R^s matrix is constructed in the same manner. Thus, for the purposes of s -strategy referring to the multitude of P^k and R^k matrices, we can build a single one-step transition matrix P^s and a single one-step payoff matrix R^s. Therefore, on condition that the process was in *i*-state, the one-step mean payoff shall be defined as:

$$r_i^s = \sum_{j=1}^{m} p_{ij}^s r_{ij}^s$$

In order to calculate the undoubted mean payoff we shall define the state probability vector within $\bar{f}^N = [p_1^N \quad p_2^N \quad \cdots \quad p_m^N]^T$ steady-state conditions, where N stands for the fact that probabilities correspond to the large step numbers accounting for the steady-state process character. In this case, the mean payoff of V^s-step shall be defined as the following value for the s -stationary strategy:

$$V^s = \sum_{i=1}^{m} p_i^N r_i^s = \sum_{i=1}^{m} p_i^N \sum_{j=1}^{m} p_{ij}^s r_{ij}^s$$

Should the payoff have a meaning of profit, the optimal strategy selection criterion is:

$$s^* \arg\square = \max_{s\in\overline{\{1,S\}}} V^s$$

Limited probability vector of states referring to Markov $\bar{p}^N$-process complies with the following matrix equation:

$$(P^s)^T \bar{p}^N = \bar{p}^N$$

At that, the condition of normalization should be performed for the probabilities of states:

$$\sum_{i=1}^{m} p_i^N = 1$$

The solution of the system comprised of two last equations allows obtaining coordinate values of $\bar{p}^N$ vector.

Solution of Reverse Problem *MDP (RPMDP)*

Let us consider what data is included into the observations and what should be found as a result of *RPMDP* solution. A multitude of presentations is available to the observations. At each n -step we can see i_n chain conditions and k_n decisions that are available for observations and which were made by the decision taker, where $i_n, k_n \in \{1; 2\}$. After the end of presentation, the *v* value of the received payoff shall be computed. Within the context of the example under consideration (IMR scanning robot), the condition is the actuation of the left or right sensor while the decision shall be its moving back making a left or right turn. A useful (without consideration of wastes) duration of the path that was made by the robot during the certain period of time (which is proportional to the scanned area) can serve as each presentation's payoff. Thus, the component of the observation that is considered within the reverse problem solution algorithm is one presentation, i.e. the totality of the alternating conditions, made decisions and presentation's total payoffs.

The result of *RPMDP* solution is the elements that are necessary for the direct problem (*DPMDP*) solving, i.e. probability and payoff matrices.

RPMDP solution scheme can be presented with 3 stages.

1st Stage. Each presentation contains the $f^s \in \{f^1, f^2, f^3, f^4\}$ strategy, which was chosen by the decision taker. The complete set of strategies is the following: $f^1 = [1 \quad 1]^T$; $f^2 = [1 \quad 2]^T$; $f^3 = [2 \quad 1]^T$; $f^4 = [2 \quad 2]^T$. Referring to each presentation, we estimate the frequencies of some decisions made within some condition. Afterwards, on the basis of these frequencies, we define the closest strategy, which later corresponds to the given presentation.

2nd Stage. The whole multitude of transition probability matrices is estimated in relation to each presentation: P^1, P^2, P^3, P^4. Each of these matrices is a conditional one (i.e. it is applied when we select the solution that corresponds to the upper index of the matrix). Similar to the 1st stage, we separately compute the frequencies of transitioning from one state to another per each presentation (using the pairs of steps of Markov chain) taking into account the made decision (conditions of the transition). The frequencies that are obtained in this manner are the estimates of one-step *MDP* conditional transition probabilities. Afterwards these probabilities are put into the corresponding places of the transition probability matrices.

3rd Stage. The purpose of constructing the payoff estimates is the following: to calculate the estimates of the payoff vector r_i^s on the basis of the observed parameters (estimates) of the transition probability matrices and according to the payoffs in each observation (presentation). For this we shall use the least square method, whose recurrent form [11] that connects the previous (q) estimates of the observations with the current ones, (q+1) is the following:

$$\hat{r}_{q+1} = \hat{r}_q + Q_q P_q \left[P_q^T Q_q P_q + 1\right]^{-1} \left[v_{q+1} - P_q^T \hat{r}_q\right]$$
$$Q_{q+1} = Q_q - Q_q P_q \left[P_q^T Q_q P_q + 1\right]^{-1} P_q^T Q_q$$

where:

$Q_q = \left(P_q^T P_q\right)^{-1}$; v_{q+1} is the payoff within the (q+1)-numbered observation; P_q is the transition matrices that are obtained on the 2nd stage within q -numbered observation.

Within the recurrent estimation equations, the *MDP* presentation is the *observation step* while the *MDP* step is actually one step of Markov chain made within the framework of the specific presentation.

With the appearance of each new q -numbered presentation of the payoff vector, its estimates are refined recurrently. This is the formal characterization of the decision taker's positive experience made with the help of *MDP*. Here we can also say that current preferences of the decision taker are approximated by the *Markov chain of decision making*.

The recurrent estimation algorithm not only removes the prior doubt, but also allows adapting to the drift of payoffs, objectives and preferences of the decision taker by correcting the strategies on the basis of the payoff vectors, which are adjusted according to the current observations of the decision taker's actions.

Model Example

In order to check the working capacity and effectiveness of the suggested scheme of the reverse problem solution (which is the nucleus of the mobile robot adaptive control procedure) we have conducted the simulation experiment. The given data was formed randomly. One of the parameter variants of the modelled *MDP* is provided in the table below.

Table 1.Parameters of Modelled *MDP*

Solutions k	Conditions i	One-Step Transition Probabilities p_{ij}		One-StepPayoffs r_{ij}	
		j=1	j=2	j=1	j=2
1	1	**0.05**	**0.95**	**45**	**79**
	2	**0.19**	**0.81**	**44**	**31**
2	1	**0.27**	**0.73**	**25**	**23**
	2	**0.48**	**0.52**	**93**	**45**

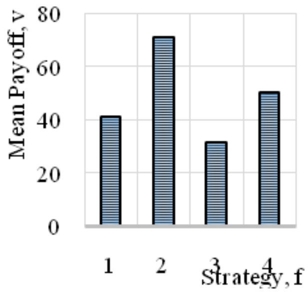


Fig. 1. Mean Payoffs

Solving direct problem by the brute-force strategy search showed that the 2nd strategy is the optimal one: $f^2 = [1 \quad 2]^T$. According to its logic, we should choose the first solution for the first process state with the second being chosen for the second one. In this case, the one-step mean payoff shall constitute 71 units within the steady-state mode. Using the Games Theory terminology, this solution corresponds to the decision taker's pure strategy. As a rule, when the operator (decision taker) controls the robot in reality, he/she takes into account a multitude of performance targets (and not only a single one). At that he/she does not "feel" the strategy, whose optimality is based on many criteria, therefore the decision taker may often use his/her own subjective and mixed control strategy.

In order to solve the reverse problem we have simulated 100 presentations, with each of them containing 30 points. It means that the modelled decision taker made 30 decisions in relation to the appearing values of the current states per each presentation. One out of four pure strategies was applied during each presentation. This data was processed in accordance with three stages of the reverse problem solution algorithm that are provided above.

According to the statistics of made decisions, we have definitely identified the pure strategies that were applied by the decision taker at the first stage. This is caused by the fact that each research considered a fully observable *MDP*.

At the second state we have computed subsequently refined estimations of one-step transition matrices. At that, within the iteration process of the estimate refinement, each of 100 presentations was used as another observation. On Picture 2 you can see step-by-step changes of the estimates referring to 4 probabilities (the total number of matrix probabilities is 8, but 4 of them are independent while the rest 4 are computed as one's complement).

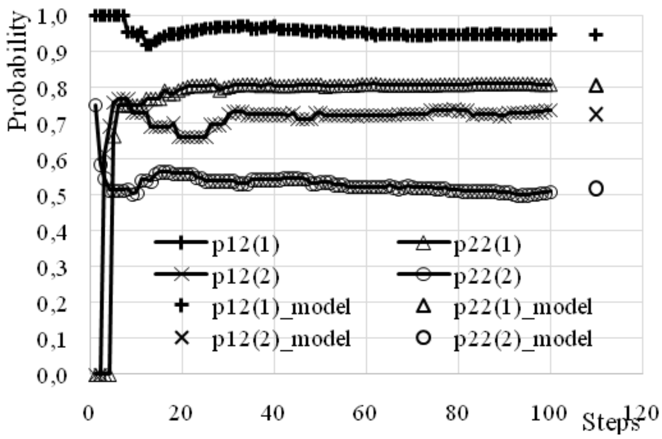


Fig. 2. Convergence of MDP's Probability Estimates

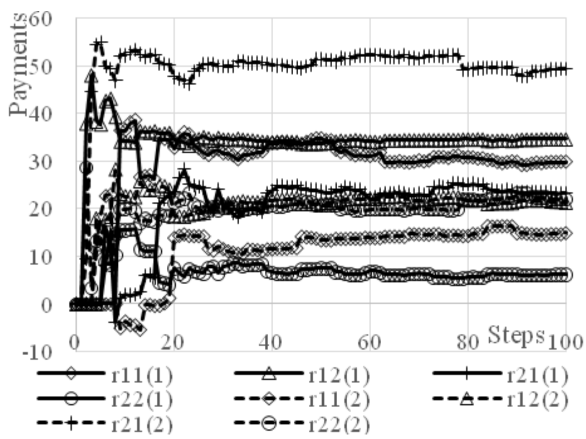


Fig. 3. Convergence of MDP's Payoff Estimates

Modelled probability values (provided in Table 1) are marked separately on Fig. 2.

r_i^k estimates of the elements that are folded into the vectors of payoff matrices are computed at the third stage with the help of the observations that are calculated on each step (i.e. that refer to each new presentation) and the payoff that corresponds to the performed presentation according to the recurrent correlations. Their sufficient number for the purposes of the considered dimensionalities is four (similar to the probability estimates). The estimate convergence of these values is shown graphically on Pic. 3, while Pic. 4 contains solutions of the direct problem *MDP* made on the basis of the step-by-step estimates. It is clearly shown on Fig. 4 that the adaptation process is converging quickly.

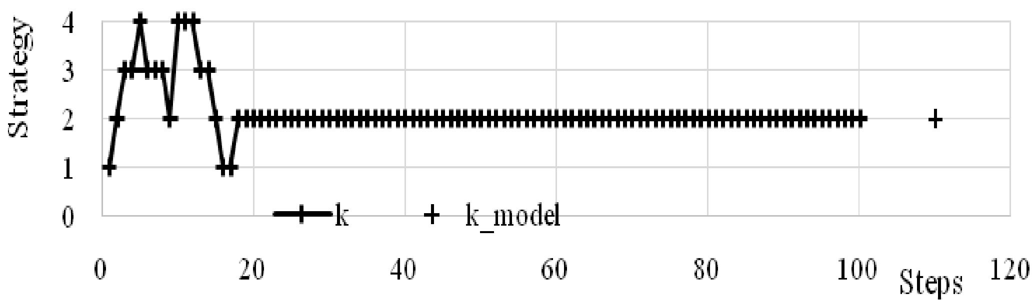


Fig. 4. Convergence of MDP Solutions According to its Parameter Estimates

Conclusions

The research that was made for other dimensionalities of state space (capacity of the sensor field) referring to the solution space showed that the solution convergence in relation to the considered class of models stays high. Moreover, the experiment optimal planning tools that are used during the RS education process allow shortening the time that is usually used to adjust the decision taker's preferences.

The preference model that is adjusted and pre-built within the RS is highly adequate to the preferences and objectives of the decision taker, while the quality of decisions that are made by the RS are not inferior to the quality of the decisions made by the "teacher" of *MDP*-model. Should the signs of the environment non-stationarity appear or should the decision taker's preferences change, the model can be re-adjusted and reloaded into the RS. The process of setting up/educating the model can be made using a separate model or a special testing device, while the *MDP*-model that was adjusted for new conditions can be loaded as a "hot" update without interrupting normal operation of the RS.

Further development of the suggested approach can unfold in several directions. In particular, we can extend the considered spectrum of the robotic system's sensor field variants and/or use *POMDP*-models.

1. M.P. Woodward, R.J. Wood Framing. Human-Robot Task Communication as a POMDP. - [Web-version]. -URL: http://arxiv.org/pdf/1204.0280.pdf. - [Last access date: 21. 05. 2015]
2. M.P. Woodward, R.J. Wood. Using Bayesian Inference to Learn High-Level Tasks from a Human Teacher. - Web-version. Conf. on Artificial Intelligence and Pattern Recognition, Orlando, FL, July 2009,pp. 138-145, 2009.
3. A.A. Zhdanov. Independent Artificial Intellect. - Moscow: BINOM Publishing House - 2008. - 359 pp.
4. S. Koenig, R.G. Simmons. Xavier: A Robot Navigation Architecture Based on Partially Observable Markov Decision Process Models.- Carnegie Mellon University. - [Web-version]. -URL: http://citeseerx.ist.psu.edu/ viewdoc/download?doi=10.1.1.130.5088&rep=rep1&type=pdf. - [Last access date: 21. 05. 2015]
5. M.E. Lopez, R. Barea, L.M. Bergasa. Global Navigation of Assistant Robots using Partially Observable Markov Decision Processes. - [Web-version]. -URL: http://cdn.intechopen.com/pdfs/141/InTech-Global_navigation_of_ assistant_robots_using_partially_observable_markov_decision_processes.pdf. - [Last access date: 21. 05. 2015]
6. S. Ong, S.W. Png, D. Hsu, W.S. Lee. POMDPs for Robotic Tasks with Mixed Observability. - Robotics: Science & Systems. - 2009. - [Web-version]. - http://www.comp.nus.edu.sg/~leews/publications/rss09.pdf. - [Last access date: 21. 05. 2015]
7. R.S. Sutton, A.G. Barto. Reinforcement Learning: An Introduction. Cambridge: The M.I.T. Press, 1998.
8. V.Ya. Vilisov. Robot Training Under Conditions of Incomplete Information. - [Web-version]. -URL: http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1402/1402.2996.pdf. - [Last access date: 21. 05. 2015]
9. H. Mine, S. Osaki. Markovian Decision Processes, NY: American Elsevier Publishing Company, Inc., 1970, p. 176.
10. V.Ya. Vilisov. Adaptive Models Used for Researching Economic Operations - Moscow: Enit Publishing House - 2007. - 286 pages.
11. R.A. Howard. Dynamic Programming and Markov Processes. - NY-London: The M.I.T. Press. - 1960.
12. G.F. Franklin, J.D. Powell, M. Workman. Digital Control of Dynamic Systems. - NY: Addison Wesley Longman. - 1998.

В.Я. Вилисов

ОБУЧЕНИЕ МОБИЛЬНОГО РОБОТА НА ОСНОВЕ АДАПТИВНЫХ УПРАВЛЯЕМЫХ МАРКОВСКИХ ЦЕПЕЙ

ООО «Энергия ИТ», Моск. обл., г. Королёв
vvib@yandex.ru

Предложен алгоритм обучения мобильного робота, основанный на аппроксимации предпочтений лица, принимающего решения (ЛПР), в интересах которого действует робот, управляемый марковской цепью. Настройка параметров модели происходит на основании данных о ситуациях и решениях, принимаемых в них ЛПР. Такая модель, адаптированная к предпочтениям ЛПР, может настраиваться либо априори, либо в процессе нормального функционирования робота, либо в ходе сеансов тестирования, спланированных специальным образом. По данным имитационного моделирования процесса функционирования робота и управления им оператора (ЛПР) выполнена настройка

параметров модели, продемонстрирована работоспособность всех элементов алгоритма и эффективность адаптации.

Введение

Существуют различные подходы к повышению эффективности работы РТС, в частности, за счет обеспечения высокой эффективность СС и/или максимально возможной автономность РТС.

В рамках первого подхода можно наращивать информативность и количество каналов сбора информации, что, однако, потребует и роста производительности бортовой вычислительной системы. Эффективность СС может также быть повышена за счет применения эффективных алгоритмов обработки данных, поступающих от СС (например, применением различных моделей фильтрации - калмановской, байесовской, *POMDP* и др., а также эффективным решением задачи *SLAM* и т. п.).В направлении первого подхода одна из задач может заключается в том, чтобы *найти структуру и состав СС, минимально достаточные для эффективного выполнения заданий РТС*.

Второй подход тесно связан с необходимостью обеспечения поведения РТС, соответствующего целевым установкам и предпочтениям лица, принимающего решения (ЛПР), в интересах которого действует РТС. Это направление тесно связано с исследованиями в области обучения РТС целесообразному поведению и эффективному взаимодействию с ЛПР[1, 2, 3]. Здесь также широко используется инструментарий байесовского обучения, марковских процессов, в том числе *POMDP*.

Решения, полученные при реализации этих подходов, часто могут дополнять и/или компенсировать недостатки друг друга.

Данная работа направлена на решение задачи выбора минимального состава СС, достаточного для автономного выполнения заданий РТС. Однако в силу ограниченного формата публикации в работе нашли отражение лишь вопросы обучения АМР предпочтениям ЛПР и оцениванию эффективности выполнения задания для фиксированной конфигурации СС. В качестве РТС рассматривается АМР с двумя контактными (или иными, функционально аналогичными) датчиками и парой ведущих колес. Задание РТС заключается в сканировании некоторой области (комнаты, территории и т.п.). Типичным примером подобного АМР является робот-пылесос (РП) или робот-газонокосильщик. Так РП может выполнять задание, сканируя помещение по одной из заложенных в него и выбранных ЛПР программ. При этом эффективность выполнения задания по разным программам будет различной, что зависит как от самой программы, так и от конфигурации помещения. Логика работы РП такова, что по разным программам поведения в одинаковых состояниях (срабатываниях определенных датчиков) он принимает различные решения. Для РП решением при срабатывании, например, левого датчика может быть отъезд с правым поворотом и т.п. В работе для простоты представления материала рассмотрен простейший вариант АМР с двумя датчиками (состояниями) и двумя решениями (вариантами действий). В частности, сенсорное поле представлено двумя передними (левый и правый) датчиками столкновения/приближения, а два действия/решения -это реакция на столкновения (состояния).Решения реализуются как отъезд с левым поворотом и отъезд с правым поворотом. Увеличение множеств состояний и решений лишь увеличит разнообразие и эффективность поведения АМР, но на содержание предлагаемого алгоритма не повлияет. Все основные математические построения выполним для случая двух состояний и двух решений.

Этот класс задач часто решается с использованием дискретных марковских процессов принятия решений (*Markov Decision Processes - MDP*). В основе предлагаемого алгоритма адаптации РТС к целевым предпочтениям ЛПР лежит решение обратной задачи для марковской цепи с платежами (*Reverse Problem for MDP - RPMDP*). Она заключается в том, чтобы по наблюдениям за эффективными действиями ЛПР вычислить оценку платежной/целевой функции *MDP*. Тогда при решении прямой задачи (*Direct Problem for MDP -DPMDP)* оптимальные управления будут адаптированы к целевым предпочтениям ЛПР.

Марковские модели в управлении РТС

Марковские цепи с платежами или *марковские цепи с доходами*, называемые еще *управляемыми марковскими цепями*, являются развитием марковских цепей, к описанию которых добавляется элемент управления - решение ЛПР при нахождении марковской цепи в том или ином состоянии. Решение представляется множеством альтернатив и соответствующим им множеством матриц вероятностей перехода.

Большую группу составляют частично наблюдаемые *MDP* (*Partially Observable Markov Decision Processes - POMDP*). В них дополнительным элементом, по сравнению с *MDP*, является множество измерений. Этот тип моделей содержит все компоненты, присущие традиционным моделям динамических управляемых систем [12], в состав которых обычно входят уравнения процесса/системы, управления и измерений. Такое представление позволяло решать три основные группы управленческих задач - фильтрации, идентификации и оптимального управления.

При использовании *MDP* в задачах управления РТС [5, 6, 7, 8, 9]платежные функции (ПФ), как правило полагаются известными, задаваемыми априори при разработке системы или управляющих алгоритмов. От структуры и параметров ПФ зависит, каким будет конкретное значение оптимального решения. Если ПФ не соответствует иерархии ценностей и системе предпочтений того ЛПР, в интересах которого действует РТС, то и найденное решение будет оптимальным относительно конкретной ПФ, но не оптимальным относительно целевых предпочтений ЛПР. Поэтому найденное любым методом оптимальное управляющее воздействие оптимально с точностью до ПФ.

*MDP*считается заданной, если известны ее такие элементы, как *множество состояний*$i=\overline{1,m}$, *вектор вероятностей начальных состояний*$\overline{p}_0 = \|p_i\|_m$, *множество* решений$k=\overline{1,K}$,*матрица условных вероятностей перехода процесса за один шаг*$P^k = \left\|p_{ij}^k\right\|_{mm}^K$, *матрица условных платежей за один шаг*$R^k = \left\|r_{ij}^k\right\|_{mm}^K$. Решением *MDP* является оптимальная стратегия f^*, как одна из множества S стратегий. Произвольная стратегия, имеющая индекс $s=\overline{1,S}$ может быть представлена как вектор-столбец вида: $f^s = [k_1^s \quad k_2^s \quad \cdots \quad k_m^s]^T$. Здесь T - символ транспонирования. Запись вектор-столбца в виде транспонированной вектор-строки здесь и далее применяется для компактности записи. Оптимальная стратегия обеспечивает максимум накопленных или средних за шаг доходов/платежей. В структуре стратегии k_i^s- это решение, которое следует принять согласно s -ой стратегии, если процесс на текущем шаге n находится в состоянииi.Структура конкретной стратегии, принятой для использования (принятия решений) в текущей реализации приводит к тому, что вместо множества матриц P^k и R^k в качестве рабочих могут быть синтезированы из них единственные матрицы соответственно P^s и R^s.

Решение прямой задачи *MDP* (*DPMDP*)

В практике решения *MDP* обычно используют[10, 11] рекуррентный алгоритм, основанный на принципе Р. Беллмана или итерационный алгоритм Р. Ховарда[11], позволяющий пошагово улучшать решение. Если пространства состояний и решений не большие, то оптимальное решений задачи может быть найдено и полным перебором стратегий. В модельных расчетах ниже использовался полный перебор.

Метод полного перебора стратегий предполагает сравнение конкурирующих стратегий по величине *среднего платежа за один шаг* в установившемся режиме. Поиск ведется в классе стационарных стратегий. Определим средний платеж за один шаг V^sдля произвольной s -ой стратегии в установившемся режиме. Для s -ой стратегии составим рабочие матрицы P^s иR^s. Они формируются из исходных множеств матриц перехода , где в качестве ключа используется конкретная конфигурация стратегии $f^s = [k_1^s \quad k_2^s \quad \cdots \quad k_m^s]^T$. Так первая строка в P^s переносится из первой строки матрицы $P^{k_1^s}$, вторая - из второй строки матрицы $P^{k_2^s}$и т.д. Аналогично конструируется и матрица R^s. Таким образом, для фиксированной s -ой стратегии по множеству матриц P^k иR^k можно построить единственную матрицу вероятностей перехода за один шаг P^sи единственную матрицу платежей за один шагR^s. Тогда средний платеж за один шаг, при условии, что процесс находился в *i*-ом состоянии, определится как:

$$r_i^s = \sum_{j=1}^{m} p_{ij}^s r_{ij}^s$$

Для вычисления безусловного среднего платежа необходимо определить вектор вероятностей состояний в установившемся режиме$\overline{f}^N = [p_1^N \quad p_2^N \quad \cdots \quad p_m^N]^T$, где$N$ означает, что вероятности соответствуют большим номерам шагов, при которых процесс носит установившийся характер. Тогда средний платеж за один шагV^s для s -ой стационарной стратегии определится как:

$$V^s = \sum_{i=1}^{m} p_i^N r_i^s = \sum_{i=1}^{m} p_i^N \sum_{j=1}^{m} p_{ij}^s r_{ij}^s$$

Если платеж имеет смысл дохода, то критерий выбора оптимальную стратегии имеет вид:

$$s^* \arg\square = \max_{s\in\{1,S\}} V^s$$

Вектор предельных вероятностей состояний марковского процесса $\bar{p}^N$ удовлетворяют следующему матричному уравнению:

$$(P^s)^T \bar{p}^N = \bar{p}^N$$

При этом для вероятностей состояний должно выполняться условие нормировки:

$$\sum_{i=1}^{m} p_i^N = 1$$

Решение системы двух последних уравнений позволяет получить значения координат вектора $\bar{p}^N$.

Решение обратной задачи *MDP*(*RPMDP*)

Рассмотрим, какие данные входят в состав наблюдений и что необходимо найти в результате решения *RPMDP*. Наблюдениям доступно множество реализаций. На каждом n -ом шаге для измерений доступны состояния цепи i_n и решения k_n, принятые ЛПР, где $i_n, k_n \in \{1; 2\}$. По окончании реализации измеряется значение полученного платежа *v*.В контексте рассматриваемого примера АМР (сканирующего робота) состоянием является срабатывание левого или правого датчика, а решением - отход с левым или правым поворотом. Платежом для каждой реализации может служить полезная (без учета отходов) продолжительность пути, пройденная роботом за фиксированный отрезок времени (что пропорционально отсканированной площади). Таким образом, одним элементом наблюдения, учитываемом в алгоритме решения обратной задачи, является одна реализация, т.е. совокупность чередующихся состояний, принятых решениям и итоговых платежей по реализации.

Результатом решения *RPMDP* являются те элементы, которые необходимы для решения прямой задачи (*DPMDP*), т.е. матрицы вероятностей и платежей.

Схема решения *RPMDP* представлена тремя фазами.

*Фаза 1.*По каждой реализации выявляется та стратегия $f^s \in \{f^1, f^2, f^3, f^4\}$, которой придерживался ЛПР. Полное множество стратегий здесь имеет такой вид: $f^1 = [1 \quad 1]^T$;$f^2 = [1 \quad 2]^T$; $f^3 = [2 \quad 1]^T$; $f^4 = [2 \quad 2]^T$. По каждой реализации оцениваются частоты принятия того или иного решения при том или ином состоянии. Затем по частотам определяется наиболее близкая стратегия, которая и ставится в соответствие данной реализации.

*Фаза 2.*По каждой реализации оценивается все множество матриц вероятностей перехода: P^1,P^2, P^3, P^4. Поскольку каждая из этих матриц является условной (т.е. она применяется при условии выбора решения, соответствующего верхнему индексу матрицы). Как и на *фазе 1*, по каждой реализации отдельно вычисляются частоты перехода из одного состояния в другое (по парам шагов марковской цепи) с учетом принятого решения (условия перехода). Полученные таким образом частоты являются оценками условных вероятностей перехода *MDP*за один шаг. Затем эти вероятности расставляются по соответствующим местам матриц условного перехода.

Фаза 3. Построение оценок платежей заключается в том, чтобы по наблюдаемым параметрам (оценкам) матриц условного перехода и по платежам в каждом наблюдении(реализации) вычислить оценки вектора платежей r_i^s. Для этого используется метод наименьших квадратов,рекуррентная форма которого[11], связывающая предыдущие (q -е) оценки наблюдений с текущими ((*q*+1) - ми), имеет следующий вид:

$$\hat{r}_{q+1} = \hat{r}_q + Q_q P_q \left[P_q^T Q_q P_q + 1\right]^{-1} \left[v_{q+1} - P_q^T \hat{r}_q\right]$$
$$Q_{q+1} = Q_q - Q_q P_q \left[P_q^T Q_q P_q + 1\right]^{-1} P_q^T Q_q$$

где:

$Q_q = \left(P_q^T P_q\right)^{-1}$;$v_{q+1}$ - платеж в (*q*+1)-м наблюдении; P_q - матрицы перехода, полученные на *фазе 2* в q -м наблюдении.

Для рекуррентных уравнений оценивания *шагом наблюдения* является реализация *MDP, а*шаг *MDP* - это один шаг марковской цепи в рамках конкретной реализации.

С появлением каждой новой q -ой реализации оценки вектора платежей рекуррентно уточняются. В этом и заключается формализация положительного опыта ЛПР с помощью *MDP*.Т.е. текущие предпочтения ЛПР аппроксимируются *марковской цепью принятия решений*.

Алгоритм рекуррентного оценивания не только снимает априорную неопределенность, но позволяет адаптироваться и к дрейфу платежей, целей и предпочтений ЛПР, корректируя стратегии на основе векторов платежей, подстроенных по текущим наблюдениям за действиями ЛПР.

Модельный пример

Для проверки работоспособности и эффективности предложенной схемы решения обратной задачи, являющейся ядром адаптивной процедуры управления мобильным роботом, был проведен имитационный эксперимент. Исходные данные генерировались случайным образом. Один из вариантов параметров моделируемого *MDP* представлен в таблице.

Таблица 1. Параметры моделируемого *MDP*.

Решения k	Состояния i	Вероятности перехода за 1 шаг p_{ij}		Платежи за 1 шаг r_{ij}	
		j=1	j=2	j=1	j=2
1	1	**0.05**	**0.95**	**45**	**79**
	2	**0.19**	**0.81**	**44**	**31**
2	1	**0.27**	**0.73**	**25**	**23**
	2	**0.48**	**0.52**	**93**	**45**

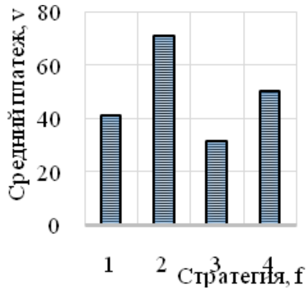


Рис. 1. Средние платежи

Решение прямой задачи методом полного перебора стратегий показало, что оптимальной является 2-я стратегия: $f^2 = [1 \quad 2]^T$.Согласно ее логике, при первом состоянии процесса следует выбирать первое решение, а при втором - второе. В этом случае средний платеж за один шаг в установившемся режиме процесса составит 71 единицу. Это решение, следуя терминологии теории игр, соответствует чистой стратегии ЛПР. В реальной действительности оператор-ЛПР, ведущий робота по территории, принимает во внимание, как правило, не единственный, а множество целевых показателей. При этом он не «чувствует» единственную оптимальную по многим критериям стратегию, поэтому может использовать для управления свою субъективно оптимальную смешанную стратегию.

Для решения обратной задачи было сымитировано 100 реализаций по 30 точек в каждой, т.е. моделируемый ЛПР 30 раз принимал решения по возникающим значениям текущих состояний в каждой из реализаций. На протяжении каждой реализации применялась одна из четырех чистых стратегий. Эти данные были обработаны в соответствии с тремя фазами приведенного выше алгоритма решения обратной задачи.

На фазе 1 по статистике принятых решений были абсолютно точно идентифицированы применяемые чистые стратегии ЛПР. Это обусловлено тем, что в данном исследовании рассматривался полностью наблюдаемый *MDP*.

На фазе 2были вычислены последовательно уточняемые оценки матриц вероятностей перехода за один шаг. При этом каждая из 100 реализаций в итерационном процессе уточнения оценок использовалась как очередное наблюдение. На рис. 2 приведены пошаговые изменения оценок 4-х вероятностей (всего в матрицах - 8 вероятностей, но 4 из них независимые, а остальные 4 - вычисляются как дополнение до единицы).

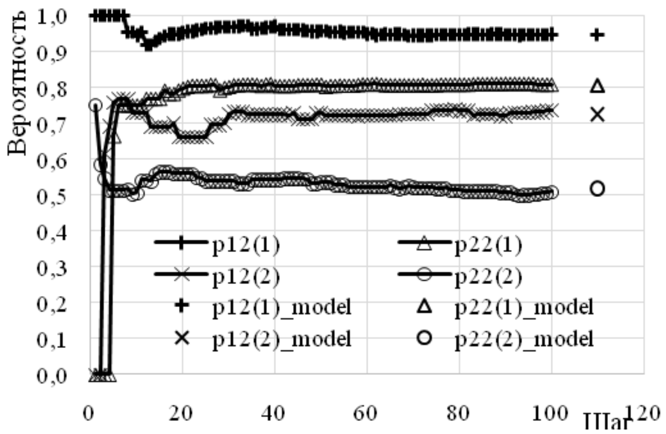


Рис. 2. Сходимость оценок вероятностей *MDP*

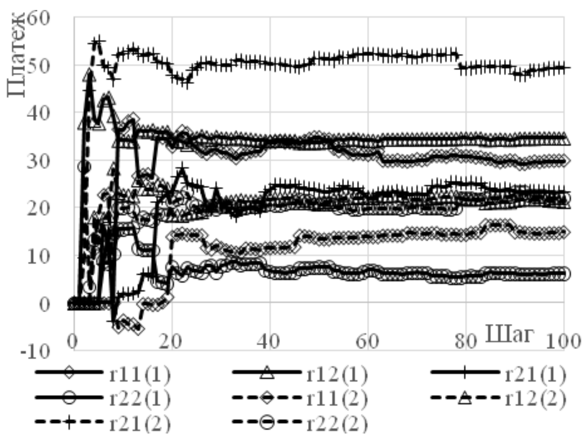


Рис. 3. Сходимость оценок платежей *MDP*

Отдельно стоящими маркерами на рис. 2 показаны моделируемые значения вероятностей (приведенные в табл. 1).

На фазе 3 с использованием вычисленных на каждом шаге наблюдений (т.е. по каждой новой реализации) и платежа, соответствующего выполненной реализации, в соответствии с рекуррентными соотношениями вычисляются оценки r_i^k элементов свернутых в векторы матриц платежей. Как и оценок вероятностей, их достаточно иметь (для рассматриваемых размерностей) всего четыре.

Графики сходимости этих оценок приведены на рис. 3. А на рис. 4 приведены решения прямой задачи *MDP* по данным пошаговых оценок. Из рис. 4 видно, что по решениям процесс адаптации сходится быстро.

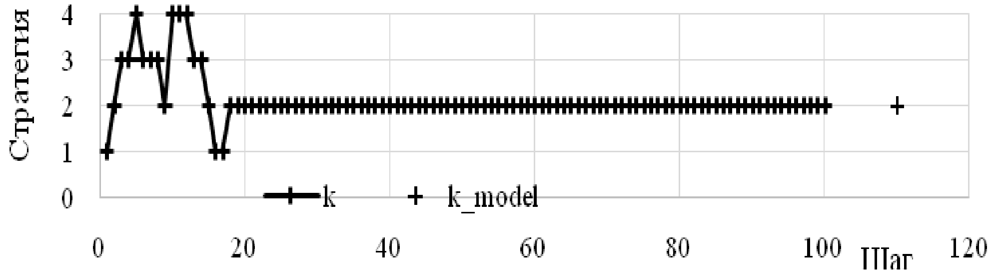


Рис. 4. Сходимость решений *MDP* по оценкам его параметров

Выводы

Исследования для других размерностей пространства состояний (мощности сенсорного поля) пространства решений показали, что сходимость по решениям для рассматриваемого класса моделей остается высокой. Кроме того, использование инструментария оптимального планирования эксперимента в процессе обучения РТС позволяет сократить время настройки на предпочтения ЛПР.

Настроенная и заложенная в РТС модель предпочтений является в высокой степени адекватной предпочтениям и целевым установкам ЛПР, а принимаемые РТС решения по качеству не будут уступать решениям «учителя» *MDP*-модели. При появлении признаков нестационарности среды или при изменении предпочтений ЛПР, модель вновь может быть перенастроена и перезагружена в РТС. Процесс настройки/обучения модели может проходить на отдельной модели или специальном стенде, а настроенная для новых условий *MDP*-модель может быть загружена, как «горячее» обновление, не прерывая нормальное функционирование РТС.

Дальнейшее развитие предложенного подхода может быть в нескольких направлениях, в частности, в расширении рассматриваемого спектра вариантов сенсорных полей РТС, а также использованием *POMDP*-моделей.

1. Woodward M.P., Wood R.J. Framing Human-Robot Task Communication as a POMDP. - [ВИнтернете]. -URL: http://arxiv.org/pdf/1204.0280.pdf. - [Дата обращения: 21. 05. 2015]
2. Woodward M.P., Wood R.J. Using Bayesian Inference to Learn High-Level Tasks from a Human Teacher. -Int. Conf. on Artificial Intelligence and Pattern Recognition, Orlando, FL, July 2009,pp. 138-145, 2009.
3. Жданов А.А. Автономный искусственный интеллект. - М.: БИНОМ. - 2008. - 359с.
4. Koenig S., Simmons R.G. Xavier: A Robot Navigation Architecture Based on Partially Observable Markov Decision Process Models.- Carnegie Mellon University. - [ВИнтернете].- URL: http://citeseerx.ist.psu.edu/ viewdoc/download?doi=10.1.1.130.5088&rep=rep1&type=pdf. - [Дата обращения: 21. 05. 2015]
5. Lopez M.E., Barea R., Bergasa L.M. Global Navigation of Assistant Robots using Partially Observable Markov Decision Processes. - [ВИнтернете]. - URL: http://cdn.intechopen.com/pdfs/141/InTech-Global_navigation_of_assistant_robots_using_partially_observable_markov_decision_processes.pdf. - [Дата обращения: 21. 05. 2015].
6. Ong S., Png S.W., Hsu D., Lee W.S. POMDPs for Robotic Tasks with Mixed Observability. -Robotics: Science & Systems. -2009. - [ВИнтернете]. - http://www.comp.nus.edu.sg/~leews/publications/rss09.pdf. - [Датаобращения: 21. 05. 2015]
7. Sutton, R. S., Barto A. G., Reinforcement Learning: An Introduction, Cambridge: The M.I.T. Press, 1998.
8. Vilisov V. Ya. Robot Training Under Conditions of Incomplete Information. - [ВИнтернете]. - URL: http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1402/1402.2996.pdf. [Датаобращения: 21. 05. 2015].
9. Mine H., Osaki S. Markovian Decision Processes, NY: American Elsevier Publishing Company, Inc., 1970, p. 176.
10. Вилисов В.Я. Адаптивные модели исследования операций в экономике. - М.: Энит. - 2007. - 286 с.
11. Howard R.A. Dynamic Programming and Markov Processes. - NY-London: The M.I.T. Press. - 1960.
12. Franklin G.F., Powell J.D., Workman M. Digital Control of Dynamic Systems. - NY: Addison Wesley Longman. - 1998.

V. Zaborovsky, V. Mulukha, A. Lukashin

EKTORNY APPROACH TO REALIZATION OF INFORMATION EXCHANGE OF CYBERPHYSICAL OBJECTS

RTC, Saint-Petersburg, Russia
vlad@neva.ru, mva@rtc.ru, lukash@neva.ru

В.С. Заборовский, В.А. Мулюха, А.А. Лукашин

ЭКТОРНЫЙ ПОДХОД К РЕАЛИЗАЦИИ ИНФОРМАЦИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КИБЕРФИЗИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург
vlad@neva.ru, mva@rtc.ru, lukash@neva.ru

Введение

Развитие современной науки показало, что не только физические явления на субатомном или вселенском уровнях, но и представления о мире, которым управляют простые причинно-следственные связи, не применимы для описания сложных процессов в технике, в живых организмах или социальных системах. Стало ясно, что факторы стохастичности и организованной сложности являются основой новой научной парадигмы. Новые фундаментальные теории в значительной степени стали базироваться на метафорических образах, которые нельзя получить путем простой экстраполяции свойств реальности, следующих непосредственно из человеческого опыта. В результате, представления о рациональном и механистическом устройстве окружающей человека природы уступили место миру потенциальных возможностей и «информационной» реальности.

Фактически, критерием физической реализуемости тех или иных научных понятий стало их соответствие логически непротиворечивым уравнениям и математическим структурам, характеризующим инварианты наблюдаемых процессов природы. Причем сам акт наблюдения непредсказуемым образом может нарушать свойства реальности, например, свойства квантовых объектов, которые «используют» для своего движения все потенциально доступные им пути перемещения. Для таких объектов такие понятия как местоположение и траектория движения потеряли физический смысл, а в учебниках источником всех «неприятностей» был признан принципом неопределенности Гейзенберга, меняющего как характер движения квантовых объектов, так и структуру пространства, в котором происходит их движение. Стало очевидным, что опираясь только на лапласовский детерминизм, принцип локальности и фактор причинности невозможно описать сущность квантовой частицы, которая при прохождении сквозь экран, меняет свое «поведение» в зависти от того, открыты ли одна или обе щели. Логически непротиворечиво объяснить это можно только тем, если в описание реальности включить атрибут информации. Тогда можно считать, что электрон получает информацию о структуре сравнительно обширной окрестности окружающего макроскопического пространства, что и влияет на его «поведение». Через неравенство Гейзенберга тесно связало макромир и микромир. Более того, представление о том, что поведение объектов предопределено набором детерминированных причин стало совершенно неприемлемым, когда речь зашла об описании «движения» живых организмов, то есть объектов, обладающих памятью и способностью к перемещению в пространстве. В итоге классическая научная концепция редукционализма, в рамках которой свойства сложной системы можно понять исходя из знания функций отдельных ее компонентов, не выдержала испытания временем, а научное описание объектов реальности наряду с фактором причинности должно включать такой атрибут как информация.

Предметом обсуждения статьи являются методы управления киберфизическими объектами, возможности которых анализируется с позиций инженерной реализации парадигмы информационно-вычислительного натурализма и технологий облачных вычислений. Возможности системы управления «вычисляется» в соответствии с фундаментальными законами физики и кибернетики на основе онтологической модели, параметры и структура которой актуализируется в процессе информационного обмена. Предложена структура системы управления информационно-открытыми киберфизическими объектами, состояние которых целенаправленно эволюционируют под воздействием физические сигналы и информационных сообщений.

В статье рассматривается задача организации специализированной облачной платформы для организации сетецентрического управления киберфизическими объектами. Применение сетецентрического подхода к задачам управления киберфизическими объектами позволяет обеспечить предоставление специального класса сервисов для решения широкого круга задач. Разработана архитектура облачной платформы, позволяющая организовать информационное взаимодействие киберфизических объектов.

Киберфизические объекты и цифровая реальность

Существующие в настоящее время методы описания физических процессов и объектов интеллектуальной деятельности не имеют общепризнанной общей теоретической базы, что затрудняет перенос результатов фундаментальных научных исследований непосредственно в практику инженерной деятельности. Возникающие трудностей носят методологический характер, а их преодоление в последнее время все чаще связывают с конструктивным воплощением идей информационно-вычислительного натурализма, одной из которых являются киберфизическая концепция реальности. Традиционной сферой киберфизики считаются диссипативные процессы, связанные с обменом энергией и веществом с целью управления синхронизацией, бифуркациями и хаосом в физико-механических, молекулярных и квантовых системах. Стремительное развитие технологий открытых информационных систем, ставших основой сетецентрического управления и технологий облачных вычислений, существенно расширило сферу прикладного использования киберфизических методов, включив в рассмотрение новый класс диссипативных систем, устойчивое функционирование которых поддерживается за счет процессов обмена информацией. Новые области киберфизики связаны с созданием распределенных систем управления объектами, которые обладают развитыми средствами обмена, хранения и обработки данными, что делает их способными к кооперативным действиям и адаптации к изменяющимся условиям или целям функционирования. Примером таких объектов является группировка мобильных роботов, совместные целевые операции которых осуществляются в условиях пространственно-временной неопределенности. Методы киберфизики существенно базируются на концепции информации как объективного атрибута реальности, характеризующего процессы отражения. Применение атрибутивного позволяет перенести хорошо развитые в теории компьютерных телекоммуникаций принципы организации открытых систем на новые классы задач управления не только физическими, но и виртуальными объектами. Возникающие при этом отношения между объектами системы и средствами управления связаны как с локальными физическими воздействиями или обменом энергией, так и с передачей данных или информационных сообщений. Расширение объема понятий «объект» и «отношение» за счет виртуализации используемых ресурсов обеспечивает целостную информационную характеризацию структуры и логики работы системы. Кроме того, виртуализация повышает функциональность алгоритмов управления за счет увеличения производительности вычислительных сервисов и повышения степеней свободы переменных состояния, входящих в общее конфигурационное пространство физических и виртуальных объектов системы.

Создание технических объектов и устройств, имеющих гибкость, адаптируемость и надежность характерную для живых организмов, но при этом обладающих большей силой и прочностью используемых элементов, является приоритетной междисциплинарной задачей современной науки. Такие устройств должны обладать развитыми способностями к кооперативному взаимодействию, основанному на восприятии, хранении и обработке больших объемов информации, поступающей как из окружающей среды, так и от других объектов, имеющих достаточно информационно-вычислительных ресурсов, чтобы оценить или использовать результаты выполняемых операций. Необходимость пространственно-временной адаптации к изменяющимся целям и характеристикам среды функционирования делает целесообразным рассмотрение процессов управления с киберфизической точки зрения. При этом организация надежной и высокопроизводительной системы информационного обмена между всеми объектами, участвующими в реализации целевых требований, приобретает приоритетное значение. В дальнейшем под киберфизическим объектом будет понимать открытую для процессов информационного обмена систему. Данные такую систему поступают по каналам компьютерной связи, а их контент характеризует заданные целевые требования, достигаемые за счет совершения физико-механических операций, энергетическое обеспечение которых осуществляется за счет его внутренних ресурсов объекта. Одним из примеров киберфизического объекта является сложное техническое устройство управляемое человеком, например самолет (см. рисунок 1). Самолет, не имея памяти и навыков пилота, сам не в состоянии выполнить те фигуры высшего пилотажа, которые совершают летчики-асы.

Другим примером киберфизического объекта может служить мобильный робот, осуществляющий сложные пространственные перемещения, отображающие содержание принятых информационных сообщений, которые формируются человеком-оператором или другим роботом, образующим с рассматриваемым объектом сеть многоцелевых операций. Онтологическая модель функционирования информационно открытого киберфизического объекта может быть представлена различными формализмами, например набором модельных операций эпистимической логики, для параметризации которых используются данные локальных измерений или сообщения, полученные от других роботов по каналам компьютерной связи. При этом использование для целей управления феномена информации позволяет эффективно применять цифровые технологии описания параметров окружающей среды, обработка которых в соответствии с когнитивной метафорой «информационный пепел реальности» позволяет «вычислять» различные сценарии достижения заданных целевых условий.

Рис. 1. Группа кибефизических объектов,
согласованно выполняющих сложные маневры

Механические и информационные воздействия на объекты управления

Цифровая природа информации используемой в системах управления киберфизическими объектами предъявляет высокие требования к доступным вычислительным ресурсам, которые необходимы для представления с достаточной точностью различных онтологических сущностей, включая различные характеристики окружающей реальности, а именно:

– модели локальных физических процессов, протекающих в объекте и системе управления;
– модели описания физических структур и отношений, характеризующих целостность объекта управления и непротиворечивость условий его функционирования;
– модели характеризующие цели управления, которые основаны на формальных теориях и выбранной системе знаний;
– модели киберфизической реальности, отражающие в цифровой форме сценарии достижения заданных целевых условий с помощью организации процессов обмена данными между актуаторными и информационными модулями системы.
– Активный характер взаимодействия описанных выше моделей позволяет осуществлять поиск информации и ее обработку с целью формирования стратегии управления, учитывающей особенности:
– структуры каналов связи и телематических сервисов, обеспечивающих получение информации, необходимой для сохранения целостности системы;
– оперативно доступных энерго-информационных ресурсов, гарантирующих достижение цели управления;
– рисков, связанных недостоверностью получаемых данных и сложностью координации действий объектов, входящих в целевую группировку.

Следует отметить, что потенциальные возможности систем управления киберфизических объектов существенно зависят от ресурсов, привлекаемых для «вычисления» траекторий их движения в конфигурационном пространстве с динамически формируемым множеством как топологических, так и механических, логических или временных ограничений. На рисунке 2 показаны механическое и информационное воздействия на физический объект, движущийся по заранее заданной траектории. Таким образом, информационная составляющая пришедшего сообщения существенным образом расширяет конфигурационное пространство системы, позволяя описывать более сложные процессы управления.

Учитывая вышесказанное, задачи, возлагаемые на современные технические средства, с каждым годом становятся все сложнее и разнообразнее. Число технических объектов, окружающих человека в повседневной жизни и на рабочем месте неуклонно растет [1]. Классические методы управления объектами показывают крайне невысокую эффективность при организации групповых действий. Каждый технический объект, участвующий в информационном обмене с другими необходимо рассматривать как информационно открытую систему, управляемую данными [2].

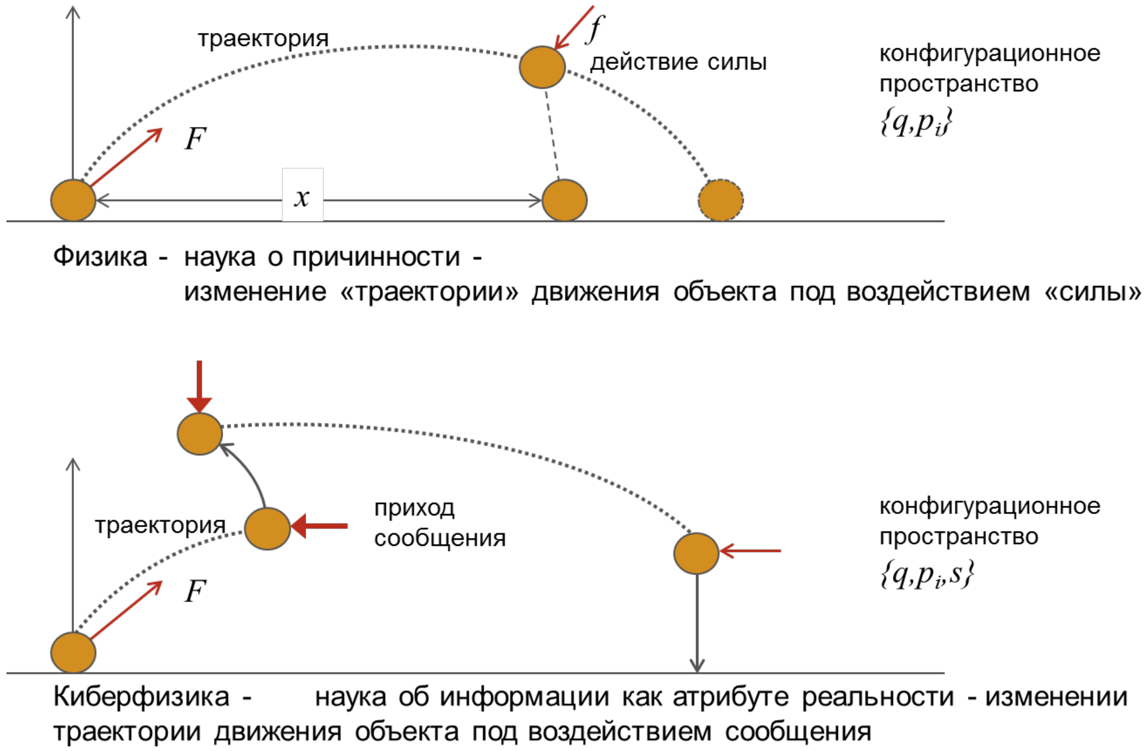


Рис. 2. Механические и информационные воздействия на физический объект

Киберфизические объекты и сетецентрический подход к организации системы управления

Новый класс технических информационно открытых объектов, поведение и состояние которых определяется получаемой ими информацией, принято называть киберфизические объекты (или системы).

В настоящий момент, для передачи данных между различными робототехническими объектами и устройствами взаимодействия с оператором используются различные носители информации – физические сигналы, с помощью которых кодируются и воспринимаются встроенными вычислителями понятия и данные, используемые в рамках выбранной схемы концептуализации реальности.

В связи с цифровой природой информации в киберфизических объектах, для организации управления сложными распределенными киберфизическими системами требуется очень существенные вычислительные мощности. Существует два варианта организации такого управления:

1. Децентрализованный вариант, при котором каждый киберфизический объект является полноценным и его ресурсов достаточно для обработки всей поступающей информации и принятия решения. Ярким примером подобного объекта может служить человек, который принимает решения самостоятельно на основании получабмых данных. Несомненным плюсом данного подхода является возможность оперативной реакции каждого киберфизического объекта на изменения в окружающей среде. Минусом является локальность принятия решения. Каждому объекту требуется больше времени для обработки данных в силу сравнительно низкой вычислительной мощности. При возникновении конфликтных ситуации киберфизические объекты должны договариваться между собой решая задачу локальной оптимизации своих действий. Некоторые киберфизические объекты могут не обладать всей полнотой данных о системе в целом и решения, основанные на неполных данных, могут быть не оптимальны с точки зрения всей системы в целом.

2. Централизованный вариант подразумевает наличие киберфизических объектов – исполнителей и центрального шлюза управления, аккумулирующего всю доступную информацию и формулирующего команды для отдельных роботов. Плюсом такого подхода является упрощение и удешевление каждого киберфизического объекта, т.к. отпадает необходимость принятия сложных решений и каждый киберфизический объект занимается исключительно контролем выполнения простой команды, выданной шлюзом. Шлюз управления способен принять оптимальное решение, т.к.

обладает всей полнотой данных от доступных киберфизических объектов. Минусом же является усложнение реакции киберфизической системы в целом на недетерминированные возмущения окружающей среды.

Использование сетецентрического метода позволяет объединить сильные стороны обоих подходов. При этом сложная команда от оператора преобразуется в последовательность простых команд с использованием шлюза управления, а при выполнении этих простых команд каждый киберфизический объект локально функционирует с учетом имеющихся у него данных. Постоянное информационное взаимодействие объектов со шлюзом позволяет корректировать поведение всей группы, как реакцию на внешние возмущения и команды оператора. А использование высокопроизводительные системы вычислений и интеллектуальных объектов, обладающих базами данных и знаний, которые нужны для достижения целей функционирования, позволяет увеличить эффективность реализации заданной целевой функции.

Поиск необходимой информации для реализации выбранной стратегии управления является важным этапом функционирования любой группы киберфизических объектов. Использование современных киберфизических подходов к описанию робототехнических систем и сетецентрических методов организации информационного взаимодействия позволяет:

– оптимизировать выбор структуры каналов связи и архитектуры телематической сети, обеспечивающих минимальный расход энергии на получение максимально полезной информации;
– осуществить концентрацию усилий всех доступных киберфизических объектов на достижение цели, поставленной оператором;
– снизить риски получения полезной информации путем координации действий группы киберфизических объектов.

При этом, носителями свойства сетецентричности можно считать методы идентификации состояния киберфизических объектов-участников выполнения операций, например, робототехнических объектов, и средства реализации механизмов обмена данными в сетевой среде, включая протоколы и интерфейсы межсетевого взаимодействия, обеспечивающие заданные характеристики качества информационного сервиса. В этих условиях сетецентричность обеспечивает возможность управления процессами информационного взаимодействия киберфизических объектов по интегральным критериям, используя для этого пространственные, временные, масштабные, тематические и контекстные характеристики. Сетецентрические решения позволяют использовать универсальные средства организации информационного обмена для объединения различных технологий, относящихся как к наблюдаемым, так и наблюдающим компонентам управляемой системы.

Реализация сетецентрического подхода с использованием облачной среды с архитектурой IaaS.

Кроме организации сети роботов важной задачей является создание вычислительной среды, в которой размещены интеллектуальные составляющие киберфизических объектов. В силу ограниченности линий связи и невозможности размещения мощных вычислителей непосредственно в киберфизические объекты является целесообразным разработка специализированных центров обработки данных с облачной архитектурой. Для создания макета такой платформы была использована облачная система «Пилигрим» типа инфраструктура как сервис, основаная на OpenStack [3, 4]. Система «Пилигрим» предоставляет масштабирование вычислительных ресурсов (виртуальных машин), обеспечивает их гетерогенность и позволяет подключить суперкомпьютерные ресурсы к облаку, образовав единое вычислительное пространство. Однако, возможностей платформы «Пилигрим» недостаточно для решения задач управления киберфизическими объектами, необходима разработка сервисов для внутреннего обмена информацией, представления вычислительных компонент киберфизических объектов, и сопряжения с удаленными объектами управления. Поэтому предложена концепция облачной среды, основанной на экторном взаимодействии вычислительных компонент и организации общей среды обмена сообщениями. Каждый киберфизический объект представлен в виде отдельного потока или нескольких потоков в облаке, который назовем эктором. Для других компонент облака эктор выглядит как черный ящик с адресом, по которому можно отправить сообщение и получить с него ответ. Вся внутренняя функциональность инкапсулирована внутри.

Такой подход реализован в экторных системах и впервые появился в языке программирования Erlang, а впоследствии был добавлен в языки Scala, Java и другие. Эктор киберфизического объекта имеет непосредственную связь со своим агентом. Это может быть робот, датчик, или удаленный сервис, который отправляет оперативную информацию с локального места действия и получает управляющие сигналы. Экторы могут обмениваться информацией между собой, при этом важно отметить, что информационный обмен происходит локально в рамках центра обработки данных, при этом агенты киберфизических объектов могут находиться на разных полушариях планеты. Кроме экторов киберфизических объектов в платформе предусмотрены сервисные экторы, которые предоставляют вспомогательные услуги, такие как доступ к информационным базам данных, топографической информации, поиску в сети Интернет и т.д.

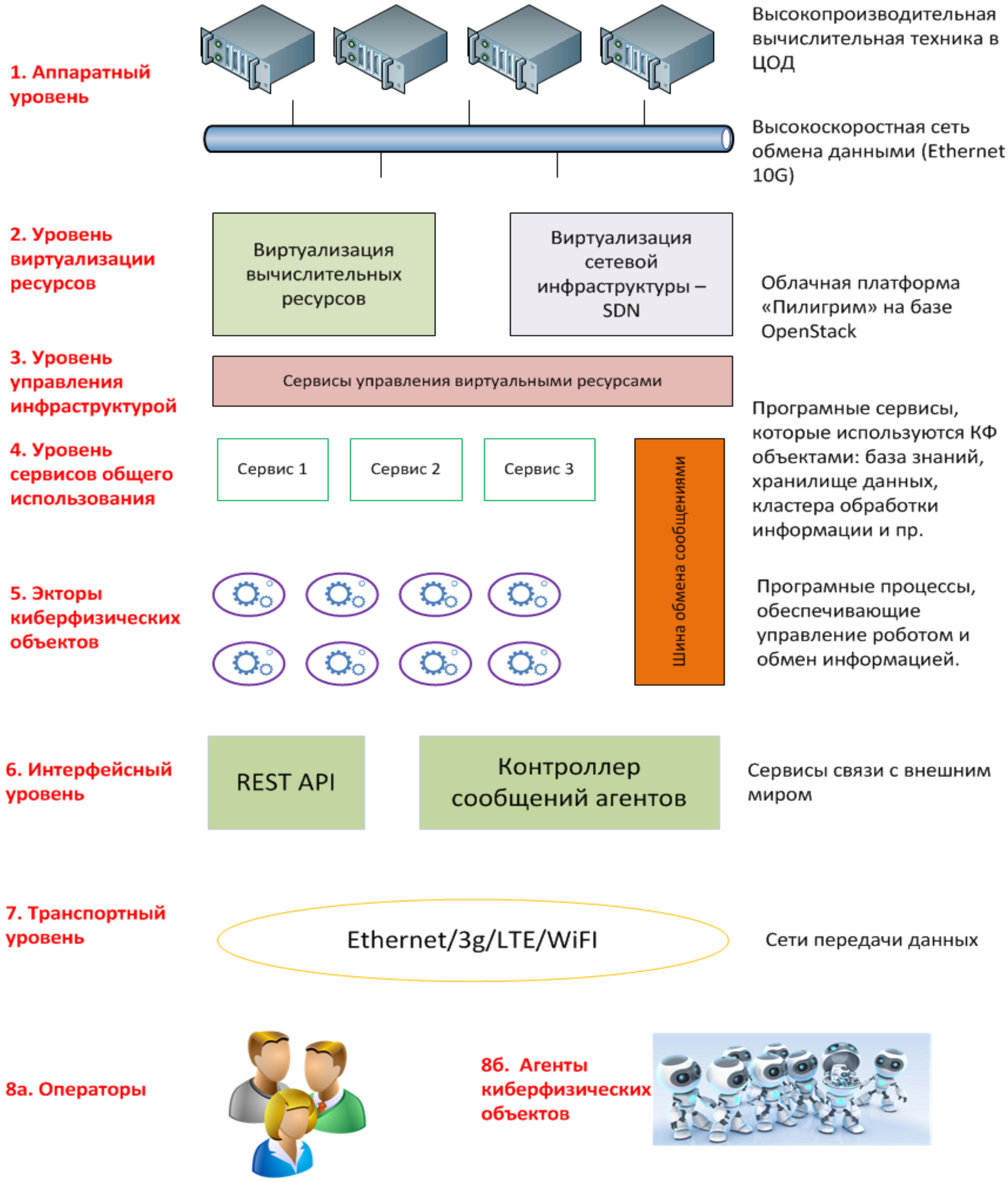


Рис. 3. Архитектурная схема облачной платформы управления киберфизическими объектами

С точки зрения облачной среды:

1. киберфизический объект – это эктор в облаке и связанный с ним удаленный агент;
2. информационный обмен осуществляется через передачу сообщений;
3. облачная платформа для управления киберфизическими объектами – это распределенная программная среда, основанная на системе типа «инфраструктура как сервис» и состоящая из экторов киберфизических объектов, сервисных экторов и специализи-рованных вычислительных компонент.

Важной особенностью рассматриваемой платформы является возможность построения оперативной ситуационной обстановки, к которой может обратиться любой эктор киберфизического объекта на основе этой информации передать управляющую команду своему агенту. Кроме того, предусмотрена возможность подписки эктора на определенные события, которые генерируются другими экторами на основе сообщений, присылаемыми их агентами. Таким образом, эктор и его агент могут получать только необходимую информацию. На рисунке 3 представлена архитектурная схема разрабатываемой платформы:

Платформа разделена на восемь уровней. Уровни 1-3 являются инфраструктурными и могут быть размещены не только на платформе «Пилигрим», но и в другой облачной среде, например, Amazon Web Services. Такой подход позволяет развернуть платформу управления киберфизическими объектами в разных инфраструктурах для частного и открытого использования. Уровни 4-6 представляют программные компоненты платформы, которые размещаются в центре обработки данных. По уровню 7 осуществляется передача данных. Последний восьмой уровень – это множество агентов и операторов. Интерфейсы и протоколы взаимодействия разрабатываемой платформы проектируются открытыми сообществу, что должно обеспечить расширяемость функциональности и возможность применения в разных сферах деятельности и промышленности.

Заключение. В работе рассматривается киберфизический подход к описанию робототехнических объектов. Рассматриваются механические и информационные воздействия, а также предлагается использовать сетецентрический подход к организации систем управления сложными объектами в условиях современной информационной реальности. Предложен экторный подход к описанию процессов информационного обмена киберфизических объектов. Для реализации предлагаемого подхода разработана архитектура облачной платформы управления киберфизическими объектами на базе платформы «Пилигрим».

1. Мулюха В.А., Заборовский В.С., Ильяшенко А.С., Лукашин А.А. Сетецентрический метод организации информационного взаимодействия киберфизических объектов в среде облачных вычислений// ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ РОБОТОТЕХНИКА. // Труды международной научно-технической конференции. – Санкт-Петербург: Изд-во «Политехника-сервис», 2014. – С. 229-234
2. Заборовский В.С., Мулюха В.А., Пашкин М.П., Попов С.Г. Сетецентрические алгоритмы управления для телематических сервисов толерантных к задержкам, Труды СПИИРАН, вып. 8(31), 2013, с. 163-176
3. Vladimir Zaborovsky, Vladimir Muliukha, Sergey Popov, Alexey Lukashin Heterogeneous Virtual Intelligent Transport Systems and Services in Cloud Environments // Proceedings of The Thirteenth International Conference on Networks (ICN 2014), February 23 - 27, 2014 - Nice, France. 2014 - pp. 236-241
4. Заборовский В.С., Лукашин А.А., Мулюха В.А. Платформа управления киберфизическими объектами // Открытые системы. СУБД. 2014 №9 С. 30-32

Yu.N. Artemenko, S.V. Volkomorov, A.P. Karpenko

DECISION SUPPORT SYSTEM PROVIDING GEOMETRY OPTIMIZATION OF MULTISECTION ARM ROBOT MANIPULATORS

MSTU, Moscow, Russia

altishenko@yahoo.com, *s.volkomorov@gmail.com, apkarpenko@mail.ru*

Introduction

Mechanical manipulators, i.e. sequential spatial mechanisms in the form of open or closed kinematic chains, are the main type of robot manipulator systems. The main advantages of a multisection arm robot manipulator (ARM), built on the basis of mechanisms of parallel structure are high precision execution of movements, high speed and acceleration of the robot hand, a high degree of unification of mechatronic assemblies. The main disadvantages are the anisotropy and heterogeneity of dynamic, elastic and velocity characteristics of the manipulator and the need to consider the possible interference of the individual manipulator kinematic chains. In general, ARMs allow for avoiding the disadvantages of the classical multisection manipulators.

Design features of ARMs are the following: wide variety of sections types; manifold of joints and rods arrangements in each such section type; large number of varying design parameters; manipulator motion redundancy. The complexity of the challenges of designing ARMs is reflected in a large number of works devoted to the creation of computer-aided design (CAD) and decision support (DSS) systems to facilitate all stages of the design process.

In the simplest case, when designing DSS, only a mathematical model of ARM is used. For example, a *MatLab* program discussed in [1] makes it possible to receive up to 300 ARM design options. Computational experiments based on various CAD systems are widely used for the analysis of ARMs. For example, in [2] values of the required drive power for the ARM are obtained in *SolidWorks*; in [3] a method of obtaining the elasto-static characteristics of the ARM's structural elements using *CATIA* and *ANSYS* is proposed. A common approach to the synthesis of the ARM is a combination of different CAD systems. For example, in [4, 5] designing an ARM type tripod in *SolidWorks* and subsequent dynamics analysis in *MatLab Simulink* are considered. There are publications where ARM models developed in *SolidWorks* are analysed in *LabView*, *ABAQUS* and *MatLab*. Some developers prefer writing plug-ins that "seamlessly" integrate and extend the capabilities of existing CAD systems. An alternative approach is to develop inhouse software products that receive ARM models built in any of the CAD systems as input and make recommendations for its transformation to the decision-maker. There are, finally, examples of the development of small specialized CAD for its transformation [7].

Functionality of known DSS providing design of ARMs does not cover all modern needs. Therefore, development of the *TRUNK* DSS under consideration in this paper is relevant.

1. Methods, Models and Algorithms Used

In *TRUNK* ARM structure synthesis is carried out by gradually increasing the detail of its model. In the first step the manipulator is represented as a cantilever beam of circular cross-section (to solve the problem of determining the shape of the arm) or as a set of cylinders (to thsolve e problem of determining the number and the shape of the sections). In the second step the resulting rough model of the arm is used as initial data for *MatLab Simulink* and refined.

Determination of the shape of a longitudinal section of the manipulator. The manipulator is represented as a cantilever beam of solid circular cross-section, the density of material is constant and equal to ρ. We presume that the beam operates under transverse load, tangential forces are neglected. We use the following three optimality criteria: the criterion of equal resistance to bending manipulator using the theory of beams of equal strength; the criterion of equal power density; the criterion of equal energy density. These criteria are considered under different types of loads: static load caused by external forces and moments; static load due to the weight of the manipulator; dynamic load caused by accelerated motion of the manipulator; dynamic load caused by the drag of the external environment when the manipulator moves.

For all mentioned criteria and load conditions integral equations for the arm radius *r* as a function of the distance x from the arm base are obtained [7]. For example, for the criterion of equal resistance to bending under inertial loading force we have the equation

$$\frac{\pi r^3(X)}{4}[\sigma] = 4g\rho\varpi'\int_X^l\left((x-X)^2 r(x) + \frac{1}{3}r^2(x)\right)dx\,. \tag{1}$$

Here, the following notation is used: $[\sigma]$ - maximum allowed stress in the material of the beam; g - acceleration of gravity; ϖ - instantaneous angular speed of rotation of the beam's downstream section starting from the arm base; l - the length of the arm, which is determined by its functional purpose.

It has been shown that some of the resulting integral equations are incorrect. We regularize the solutions using cubic approximation and stabilizing functional [7].

Regularized equation (1) (and other similar equations) are solved by converting them to the calculus of variations problems of the like

$$\min_{r(X)} \Phi(r) = 0,\ r(X) \in C^1[0;l], \tag{2}$$

where $C^1[0;l]$ is the space of nonnegative functions that are continuous on the interval $[0;l]$ with their first derivatives.

Problem (2) is solved by reducing it to the multidimensional global constrained optimization

$$\min_{\mathbf{r}} \Phi(\mathbf{r}) = 0,\ \mathbf{r} \in D_r, \tag{3}$$

for values of function $r(X)$ in *n* uniform grid nodes covering the interval $[0;l]$ which form an $(n\times 1)$ r vector. Here D_r is the set of admissible values of r components. We use the linear approximation of the function $r(X)$ in the intervals between the nodes of said grid. The problem (3) is reduced to unconstrained optimization using penalty function method. To solve the latter problem Nelder-Mead algorithm in combination with the multistart method is applied.

Optimization of the size of the ARM sections. The range $[0;l]$ is partitioned to form a grid of $(N+1)$ nodes and the arm is divided into N sections at the nodes of said grid that are perpendicular to the longitudinal axis $0x$ of the arm. l_i denotes the length of the i^{th} section, the left boundary of which is in the node x_{i-1}, and the right boundary is in the node x_i. We presume that the elastic properties of the material of each of the sections are identical and that its compliance ς (reciprocal of rigidity) is proportional to the length and inversely proportional to the left cross-section area of the section. We demand that compliance for all sections is the same:

$$\frac{l_1}{\pi r^2(x_0)} = \frac{l_2}{\pi r^2(x_1)} = \ldots = \frac{l_N}{\pi r^2(x_{N-1})} = \pi\varsigma \,. \tag{4}$$

The system (4) is a system of N nonlinear equations for l_i. The analytical solution of this problem is not possible. We use an approach based on reducing the problem to the problem of multi-parameter constrained optimization with optimality criterion

$$F(\mathbf{l}) = \sum_{i=2}^{N}\left(\frac{l_i}{r^2(l_1,l_2,\ldots,l_{i-1})} - \frac{l_{i-1}}{r^2(l_1,l_2,\ldots,l_{i-2})}\right)^2 \to \min_{\mathbf{l}} \,,$$

where l is an $(N\times 1)$ vector with components $l_1, l_2, \ldots, l_N$. The latter problem is solved with the method used for solving the problem (3).

Clarification of the geometric parameters of the ARM. To solve this problem a mathematical model of the ARM made in MatLab Simulink is used. We optimize the angular dimensions (angles between hinges connecting ARM's platforms and rods) and as the linear dimensions (the radii of the platforms and the heights of the sections). The optimality criterion is based on the compliance of the construction when loaded by an external force applied to the last platform of the ARM. For convenience the following subsystems of the model highlighted: the level of the manipulator as a whole; the level of the manipulator sections; the level of the manipulator rods; the level of the automatic control system (ACS) of the manipulator rod. Ultimately, the task of clarifying the geometric parameters of the ARM is reduced to the problem of global multidimensional constrained optimization. To solve this problem a MatLab-program implementing the famous and highly effective optimization method SQP is used.

Planning of the target configuration and path of movement synthesis. We consider the problem of target configuration planning and trajectory synthesis of the N-sectional ARM for cases of absence and presence of obstacles in its operating area. Each of the arm sections is assumed to be a truncated right circular cone. The mass of each section is assumed to be uniformly distributed in said cone.

ARM target configuration is determined based on the following requirements: distance from each of the sections of the manipulator to each of the obstacles is not less than a predetermined value; the end of the robot hand coincides with a predetermined target point; the robot hand has a predetermined angle with the axes of the fixed coordinate system; the minimum of the functional $J(q)$ is provided, where $q \in Q$ is the vector of the generalized coordinates of the ARM and Q is the set of admissible values of the vector components. For $J(q)$ we consider a) the potential energy of the manipulator and b) its total curvature. The problem of planning the target configuration is ultimately reduced to the problem of global constrained optimization. This problem is solved using methods of nonlinear programming discussed above and a particle swarm method [8].

Optimizational, geometric and combined approaches are proposed for ARM's path of movement synthesis. The optimizational approach is based on reducing this problem to a multi-dimensional global constrained optimization for the components of the vector q of the generalized coordinates of the manipulator. The problem is solved using the same methods as the problem (3). Geometric approach implements a method of simple gradient descent in the space of generalized coordinates of the ARM: in the current position of the manipulator its generalized coordinates for each of the joints are incremented by an amount proportional to how these increments advance the robot hand closer to the target position. Combining the above methods provides good results. In this case optimizational approach builds a configuration in which the robot hand is close to the target point and has a minimum curvature and geometric method finds the shortest route to the target point based on the approximation found by the optimization method.

Construction of ARM attainability domain and determination of its parameters. TRUNK system uses an algorithm for constructing a finite-dimensional approximation of the attainability domain of the manipulator (ADM), the scheme of which is as follows: a) based on the required accuracy of approximation set Q is partitioned into uniform or random grid Z with nodes q_i where i is a multi-index; b) for each of the nodes $q_i \in Z$ the direct kinematic problem is solved determining the appropriate position of the robot hand; c) piecewise linear approximation of the border of the resulting discrete set is obtained providing a continuous approximation of the ADM border. All the results of solving the direct kinematic problems are stored in the system's database to use later as initial approximations for inverse kinematic problem.

On the basis of this piecewise linear approximation of the ADM the *TRUNK* system calculates the default parameters for this domain: volume of the ADM; Lee-Yang criterion; normalized volume of the ADM; robot hand attainability bounds; servicing area; service ration; directional manipulative capability.

2. Software Implementation

The overall structure of the system is shown in Figure 1. The subsystem of structural synthesis of the ARM, interacting with external systems, with the participation of decision-makers implement the following functions: synthesis of the structure of the mechanism, taking into account the requirements for its kinematics; analysis of the synthesized structure for compliance with the geometric requirements; the formation of the layout 3D-model of the mechanism in a CAD-system; the formation of the model of the mechanism in a simulation system.

DSS has a client-server architecture and consists of the following layers: the presentation layer; the layer of services; the business logic layer; the data access layer. The presentation layer includes workplace for the decision-maker, as well as client applications used. The layer of services provides routing for client requests to the correct server, as well as acting as user authentication and authorization, that is, this layer implements a gateway between the client and the server. The business logic layer implements the functions of forming a model of the designed object. At the layer of data access queries, transactions, and access rights checks for the database objects and so on are made.

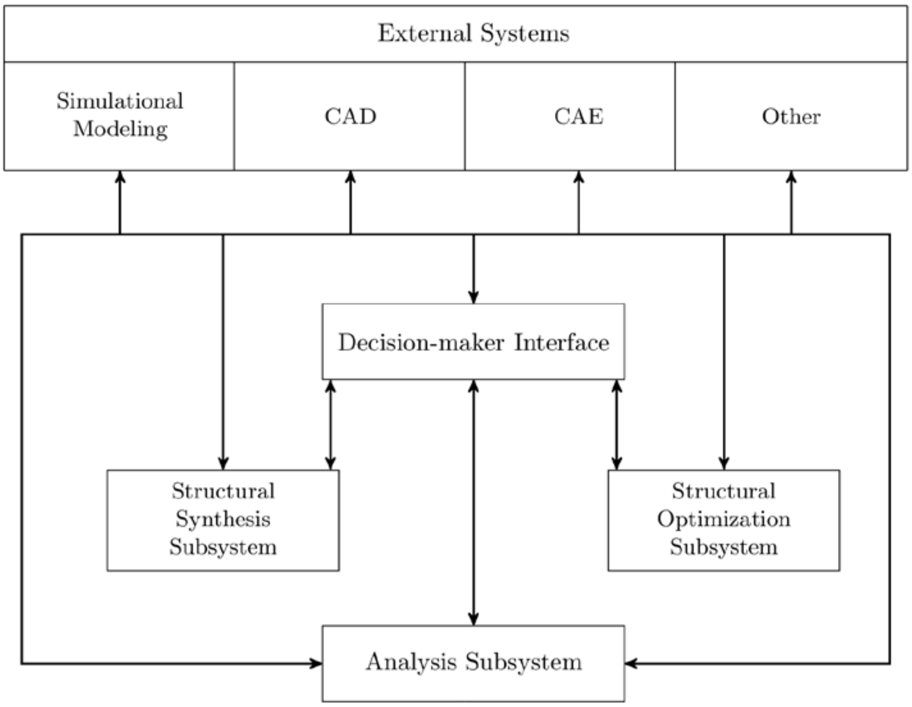


Fig. 1. *TRUNK Structure*

The system is implemented in the C ++ programming language because of its cross-platform capabilities and high efficiency. It uses cross-platform Qt framework, which compiles for most of the modern operating systems without altering the source code. Qt has a significant advantage providing the ability to integrate its tools into the Microsoft Visual Studio IDE which is a recognized means of software development under Windows, as well as having its own cross-platform development environment QtCreator. It is also important that Qt includes a three dimensional graphics renderer and cross-platform implementations of many programming tasks, from file input-output operations to networking, databases and XML.

DSS is written in accordance with the teachings of object-oriented programming. It is composed of a set of hierarchically interconnected classes. The interface is standard, familiar to users. The system is expandable, so that it may include other models, methods, algorithms and programs implementing them.

3. Synthesis of a parallel structure manipulator to control the orientation of the space telescope "Millimetron" by means of the developed DSS

Russian Federal Space Program provides for the establishment of the space observatory "Millimetron" (project Spektr-M) with expanding adaptive antenna with a diameter of 10 m, operating in the wavelength range from 20 mm to 20 mm [9]. The synthesis of the geometry of one embodiment of the device for controlling the orientation of the antenna of the observatory is carried out by means of the developed *TRUNK* DSS.

Hexapod parallel kinematics mechanisms (Stewart platform) are used as sections of the manipulator. Total number of sections should not exceed five out of considerations of reliability and ease of management. We presume that in order to minimize the weight of the manipulator platform hexapods are made in the form of tubular carbon fiber equilateral triangles with the tops cut off. Hexapods rods can be two- or threefold (ie, consist of two or three sub-rods) and made of the same carbon fiber. The manipulator must provide attitude control for the antenna within the hemisphere whose axis of symmetry coincides with the longitudinal axis of symmetry of the spacecraft. In all cases the antenna must be at least 500 mm away from the first platform base. (Figure 2).

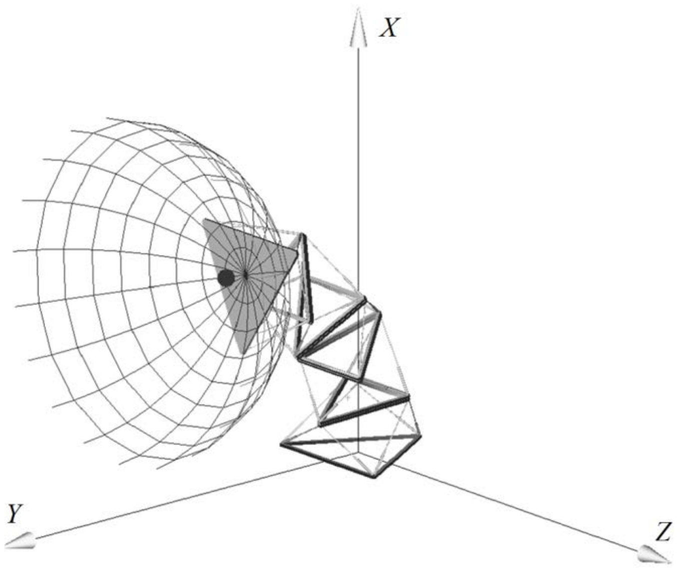


Fig. 2. Antenna and manipulator model

Arm section dimensions and rod lengths that satisfy the above restrictions are obtained by means of the developed *TRUNK* DSS. The synthesis of the desired trajectory of movement of the antenna of the observatory is carried out. For the validation of the results and the analysis of the simulated manipulator mechanism the NX system is used.

Conclusion

Methods for structural synthesis of a multisectional ARM are developed, including determination of the optimal form and dimentions of sections for different optimization criteria and load types; methods of target configuration planning and trajectory synthesis of the ARM in the presence and absence of obstacles are developed, including the method of solving the problem of the trajectory synthesis based on a combination of geometric and optimization approaches. The structure of the *TRUNK* DSS for automated synthesis of a multisectional ARM is proposed. Software implementation of the system is carried out. Synthesis of the manipulators with different types of platforms is fulfilled by means of the developed *TRUNK* DSS as a part of the Millimetron Space Observatory project (project Spektr-M); the problem of the trajectory synthesis of the manipulator movement for various modes of observatory antenna positioning is solved.

1. M. Nefzi, M. Riedel, B. Corves. Towards an automated and optimal design of parallel manipulators // Automation and Robotics, 2009, P.143–156.
2. Kinematic and dynamic analysis of the 2-DOF spherical wrist of orthoglide 5-axis / Raza Ur-Rehman, St´ephane Caro, Damien Chablat et al. // Troisi`eme Congr`es International. Conception et Mod´elisation

des Syst`emes M´ecaniques, 3rd International Congress Design and Modelling of Mechanical Systems CMSM, Hammamet, Tunisia, 2009, March 16–18, P.1–8.
3. A. Klimchik, A. Pashkevich, D. Chablat. CAD-based approach for identification of elasto-static parameters of robotic manipulators // Finite Elements in Analysis and Design, 2013, V.75, P.19–30.
4. N. Tlale, P. Zhang. Teaching the design of parallel manipulators and their controllers implementing MATLAB, Simulink, SimMechanics and CAD // International Journal of Engineering Education, 2005, V.21, No.5, P.838–845.
5. Л. Рыбак, А. Чичварин А. Моделирование динамики манипулятора-трипода с шестью степенями подвижности // X всероссийская научно-практическая конференция с международным участием “Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Энергосбережение. Экология. Новые технологии”, г. Старый Оскол, 2013, 25–27 ноября, Т.II, С. 87–91.
6. K. Mekhnacha, E. Mazer, P. Bessiere. The design and implementation of a Bayesian CAD modeler for robotic applications // Advanced Robotics, 2001, V.15, No.1, P. 45–69.
7. С.В. Волкоморов, А.П. Карпенко. Оптимизация геометрии многосекционного манипулятора типа хобот // Мехатроника, автоматизация, управление, 2012, №3, С.23–27.
8. А.П. Карпенко, Е.Ю. Селиверстов. Глобальная оптимизация методом роя частиц. Обзор // Информационные технологии, 2010, № 2, С.25-34.
9. W. Wild, N.S. Kardashev. Millimetron - a large Russian-European submillimeter space observatory // Exp Astron, 2009, V.23, P.221-244.

Ю.Н. Артеменко, С.В. Волкоморов, А.П. Карпенко

СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ДЛЯ СИНТЕЗА И ОПТИМИЗАЦИИ ГЕОМЕТРИИ МНОГОСЕКЦИОННОГО РОБОТА-МАНИПУЛЯТОРА ТИПА ХОБОТ

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва
altishenko@yahoo.com, s.volkomorov@gmail.com, apkarpenko@mail.ru

Введение

В настоящее время основным типом манипуляционных систем роботов являются механические манипуляторы, которые представляют собой пространственные механизмы последовательной структуры в виде разомкнутых или замкнутых кинематических цепей. К основным преимуществам многосекционного робота-манипулятора типа хобот (МТХ), построенного на основе механизмов параллельной структуры, относятся высокая точность исполнения движений, высокие скорости и ускорения рабочего органа (схвата), высокая степень унификации мехатронных узлов. Основные недостатки заключаются в анизотропии и неоднородности динамических, упругих и скоростных свойств манипулятора и в необходимости учета возможной интерференции отдельных кинематических цепей манипулятора. В целом, МТХ позволяют в значительной степени избежать недостатков, присущих классическим многосекционным манипуляторам.

Имеют место следующие особенности проектирования МТХ: многообразие типов секций; многообразие конструкций шарниров и штанг в рамках каждого типа секций; большое число варьируемых параметров конструкции; избыточность движения манипулятора. Сложность задач проектирования МТХ нашла свое отражение в большом числе работ, посвященных созданию систем автоматизированного проектирования (САПР) и систем поддержки принятия решений (СППР) для облегчения всех этапов процесса проектирования МТХ.

В простейшем случае для построения указанных СППР используют лишь математическую модель МТХ. Например, *MatLab*-программа, рассмотренная в работе [1], позволяет получать до 300 вариантов конструкции МТХ. Для анализа МТХ активно используют вычислительные эксперименты на основе различных САПР. Например, в работе [2] в среде *SolidWorks* получены величины требуемой мощности приводов МТХ; в работе [3] предложен метод получения упругостатических характеристик элементов конструкции МТХ с помощью САПР *CATIA* и *ANSYS*. Распространенным подходом к синтезу МТХ является комбинирование различных САПР. Так, в работах [4, 5] рассмотрено проектирование МТХ типа трипод в системе *SolidWorks* и последующий анализ динамики конструкции в системе *MatLab Simulink*. Известны публикации, в которых разработанная в *SolidWorks* модель МТХ, исследуется с помощью систем *LabView*, *ABAQUS* и *MatLab*. Некоторые разработчики предпочитают писать плагины, которые «бесшовно» интегрируются и расширяют возможности существующих САПР. Альтернативным подходом является разработка собственных программных продуктов, которые получают на вход модель МТХ, построенную в какой-либо из САПР, и дают рекомендации лицу, принимающему решения (ЛПР), по ее трансформации. Известны, наконец, примеры разработки небольших специализированных САПР [7].

Функциональность известных СППР, ориентированных на проектирование МТХ, не покрывает всех современных потребностей. Поэтому актуальной является разработка рассматриваемой в работе СППР, названной *TRUNK*.

1. Используемые модели, методы и алгоритмы

В системе *TRUNK* синтез структуры МТХ осуществляем путем постепенного повышения детализации его модели. На первом этапе манипулятор представляем в виде консольной балки круглого поперечного сечения (для задачи определения формы «хобота») или в виде совокупности цилиндров (для задач определения числа и формы секций). Полученную в результате грубую модель «хобота» уточняем на втором этапе, используя ее параметры в качестве исходных данных для построения модели МТХ в программном пакете *MatLab Simulink*.

Определение формы продольного сечения МТХ. Манипулятор представляем в виде консольной балки сплошного круглого сечения, плотность материла которой постоянна и равна ρ. Полагаем, что балка функционирует в условиях изгиба, касательными напряжениями пренебрегаем. Используем три следующих критерия оптимальности: критерий равного сопротивления манипулятора изгибу, использующий теорию балок равного сопротивления; критерий равной удельной мощности; критерий равной удельной энергии. Указанные критерии применяем при различных видах нагрузки: статическая нагрузка, вызванная внешними силами и моментами; статическая нагрузка, обусловленная весом манипулятора; динамическая нагрузка, возникающая при ускоренном движении частей манипулятора; динамическая нагрузка, вызванная наличием лобового сопротивления внешней среды при движении в ней манипулятора.

Для всех указанных критериев оптимальности и условий нагружения получены интегральные уравнения для радиуса манипулятора r как функции расстояния x от основания «хобота» [7]. Например, для критерия равного сопротивления изгибу и случая нагружения силой, обусловленной моментом инерции, имеем уравнение

$$\frac{\pi r^3(X)}{4}[\sigma] = 4g\rho\varpi' \int_X^l \left((x-X)^2 r(x) + \frac{1}{3} r^2(x) \right) dx . \tag{1}$$

Здесь приняты следующие обозначения: $[\sigma]$ - максимально допустимое напряжение в материале балки; g - ускорение свободного падения; ϖ - угловая мгновенная скорость вращения части балки, расположенной далее сечения X, считая от основания «хобота»; l - длина манипулятора, определяемая его функциональным назначением.

Показано, что некоторые из полученных интегральных уравнений являются некорректными. Используем методы регуляризации решения с помощью его кубической аппроксимации, а также с помощью стабилизирующего функционала [7].

Регуляризованные уравнение (1) (и другие аналогичные уравнения) решаем путем преобразования к задаче вариационного исчисления вида

$$\min_{r(X)} \Phi(r) = 0 , \; r(X) \in C^1[0;l] , \tag{2}$$

где $C^1[0;l]$ - пространство неотрицательнозначных функций, непрерывных на интервале $[0;l]$ вместе со своей первой производной.

Задачу (2) решаем методом сведения к задаче многомерной глобальной условной оптимизации

$$\min_{\mathbf{r}} \Phi(\mathbf{r}) = 0 , \; \mathbf{r} \in D_r , \tag{3}$$

относительно значений функции $r(X)$ в n узлах равномерной сетки, покрывающей интервал $[0;l]$, которые образуют $(n \times 1)$-вектор $\mathbf{r}$. Здесь D_r - множество допустимых значений компонентов вектора $\mathbf{r}$. Используем линейную аппроксимацию функции $r(X)$ в промежутках между узлами указанной сетки. Для решения задачи (3) используем ее сведение к задаче безусловной оптимизации с помощью метода штрафных функций. Для решения последней задачи применяем алгоритм Нелдера-Мида в комбинации с методом мультистарта.

Оптимизация размера секций МТХ. Покрываем интервал $[0;l]$ сеткой с $(N+1)$ узлами, и разбиваем «хобот» сечениями, проходящими через узлы указанной сетки и перпендикулярными продольной оси «хобота» $0x$, на N секций. Обозначаем l_i длину i-ой секции, левая граница которой проходит через узел x_{i-1}, а правая - через узел x_i. Полагаем, что упругие свойства материала каждой из секций одинаковы и что податливость ς (величина, обратная жёсткости) пропорциональна длине этой секции и обратно пропорциональна площади ее левого поперечного сечения. Требуем, чтобы так определенная податливость всех секций была одинакова, то есть требуем выполнения равенств

$$\frac{l_1}{\pi r^2(x_0)} = \frac{l_2}{\pi r^2(x_1)} = ... = \frac{l_N}{\pi r^2(x_{N-1})} = \pi\varsigma . \qquad (4)$$

Система (4) представляет собой систему N нелинейных уравнений относительно неизвестных l_i. Аналитическое решение этой задачи не удается. Используем подход, основанный на сведении задачи к задаче многопараметрической условной оптимизации с критерием оптимальности

$$F(\mathbf{l}) = \sum_{i=2}^{N}\left(\frac{l_i}{r^2(l_1,l_2,...,l_{i-1})} - \frac{l_{i-1}}{r^2(l_1,l_2,...,l_{i-2})}\right)^2 \to \min_{\mathbf{l}} ,$$

где $\mathbf{l}$ - $(N\times1)$-вектор с компонентами $l_1,l_2,...,l_N$. Последнюю задачу решаем по схеме решения задачи (3).

Уточнение геометрических параметров МТХ. Для решения этой задачи используем математические модели МТХ, построенные средствами программной системы *MatLab Simulink*. В качестве оптимизируемых угловых размеров выступают углы между шарнирами, связывающими платформы МТХ и его штанги, а в качестве линейных размеров – радиусы платформ и высоты секций МТХ. Критерий оптимальности строим на основе податливости конструкции при нагружении внешней силой, приложенной к последней платформе МТХ. Для удобства работы с *MatLab*-моделями МТХ в них выделены следующие подсистемы: уровень манипулятора в целом; уровень секции манипулятора; уровень штанги манипулятора; уровень системы автоматического управления (САУ) штангой манипулятора. В конечном счете, задачу уточнение геометрических параметров МТХ сводим к многомерной задаче глобальной условной оптимизации. Для решения этой задачи используем *MatLab*-программу, реализующую известный и высокоэффективный метод оптимизации *SQP*.

Планирование целевой конфигурации и синтез траектории движения МТХ. Рассматриваем задачи планирования целевой конфигурации и синтеза траектории движения *N*-секционного МТХ для случаев отсутствия и наличия препятствий в его рабочей зоне. Каждую из секций манипулятора полагаем усеченным прямым круговым конусом. Массу каждой из секций принимаем равномерно распределенной в указанном конусе.

Целевую конфигурацию МТХ определяем, исходя из следующих требований: каждая из секций манипулятора отстоит от каждого из препятствий не менее чем на заданную величину; конец схвата манипулятора совпадает с заданной целевой точкой; схват манипулятора имеет заданный угол с осями неподвижной системы координат; обеспечивается минимум заданного функционала $J(\mathbf{q})$, где $\mathbf{q}\in Q$ - вектор обобщенных координат МТХ; Q - множество допустимых значений компонентов этого вектора. В качестве функционала $J(\mathbf{q})$ рассматриваем а) потенциальную энергию манипулятора, б) его суммарную кривизну. Задачу планирования целевой конфигурации МТХ сводим, в конечном счете, к задаче глобальной условной оптимизации. Решаем эту задачу рассмотренными выше методами нелинейного программирования, а также методом роя частиц [8].

Для синтез траектории движения МТХ используем оптимизационный, геометрический и комбинированный подходы. Оптимизационный подход основан на сведении данной задачи к задаче многомерной глобальной условной оптимизации относительно компонентов вектора $\mathbf{q}$ обобщенных координат манипулятора. Задачу решаем по схеме решения задачи (3). Геометрический подход реализует, по сути, метод простого градиентного спуска в пространстве обобщенных координат МТХ: в текущем положении манипулятора его обобщенным координатам в каждом из сочленений манипулятора даем приращения на величины, пропорциональные тому, насколько эти приращения приближают схват к цели. Хорошие результаты показывает комбинирование указанных выше методов. При этом оптимизационный метод строит конфигурацию, в которой схват манипулятора близок к целевой точке и обладает минимальной кривизной, а геометрический метод кратчайшим путем совмещает точки схвата и цели, исходя из приближения, найденного оптимизационным методом.

Построение области достижимости МТХ и определение ее параметров. Система *TRUNK* использует алгоритм построения конечномерной аппроксимации области достижимости манипулятора (ОДМ), схема которого имеет следующий вид: а) исходя из требуемой точности аппроксимации границы ОДМ покрываем множество Q равномерной или случайной сеткой Z с узлами $\mathbf{q}_I$, где I – мультииндекс; б) для каждого из узлов $\mathbf{q}_I\in Z$ решаем прямую позиционную задачу - определяем соответствующее положение конца схвата; в) кусочно-линейно аппроксимируем границу полученного дискретного множества – получаем непрерывную аппроксимацию границы ОДМ. Все результаты решения прямой позиционной задачи сохраняем в базе данных системы с целью использования в последующем для формирования начальных приближений при решении обратной позиционной задачи.

На основе указанной кусочно-линейной аппроксимации ОДМ система *TRUNK* вычисляет значения стандартных параметров этой области: объем ОДМ; показатель Ли-Янга; нормированный объем ОДМ; пределы достижимости схвата; зона обслуживания; коэффициент сервиса; манипулятивность в заданном направлении.

2. Программная реализация СППР

Общая структура системы представлена на Рисунке 1. Подсистема структурного синтеза МТХ, взаимодействуя с внешними системами, при участии ЛПР реализует следующие основные функции: синтез структуры механизма с учетом требований к его кинематике; анализ синтезированной структуры на соответствие геометрическим требованиям; формирование компоновочной 3*D*-модели механизма в *CAD*-системе; формирование модели механизма в системе имитационного моделирования.

СППР имеет клиент-серверную архитектуру и состоит из следующих слоев: слой представления; слой сервисов; слой бизнес-логики; слой доступа к данным. Слой представления включает в себя рабочее место ЛПР, а также используемые клиентские приложения. На уровне сервисов обеспечивается маршрутизация клиентских запросов к нужному серверу, а также выполнение функций аутентификации и авторизации пользователя, то есть данный слой реализует шлюз между клиентом и сервером. Слой бизнес-логики реализует функции формирования модели проектируемого объекта. На уровне доступа к данным производится выполнение запросов, транзакций, проверка прав доступа к объектам базы данных и так далее.

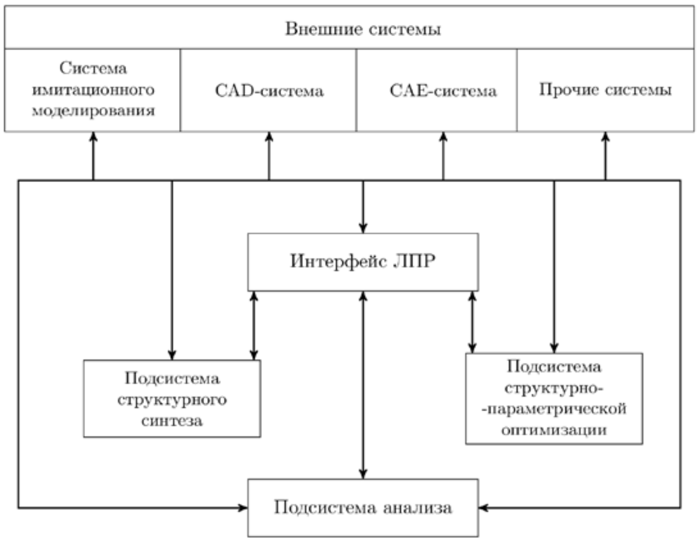


Рис.1. Структура СППР *TRUNK*

Система реализована на языке программирования С++ в силу его кроссплатформенности и высокой эффективность. Использован кросс-платформенный инструментарий разработки *Qt*, который позволяет запускать написанное с его помощью программное обеспечение под управлением большинства современных операционных систем без изменения исходного кода программы. Существенным преимуществом *Qt* является возможность интеграции этого инструментария в среду *Microsoft Visual Studio*, являющуюся признанным средством разработки программного обеспечения на языке С++ под управлением операционной системы *Windows*, а также наличие собственной кроссплатформенной среды разработки *QtCreator*. Важно также, что инструментарий *Qt* включает в себя средства визуализации трехмерной графики, кроссплатформенные реализации многих программистских задач, начиная с файлового ввода-вывода и заканчивая работой с коммуникационной сетью, базами данных и *XML*.

СППР написана в соответствии с идеями объектно-ориентированного программирования, то есть состоит из набора классов, иерархически связанных между собой. Интерфейс программы имеет стандартный, привычный для пользователей вид графических окон. Система является расширяемой, так что в нее могут быть включены другие модели, методы, алгоритмы и реализующие их программы.

3. Синтез средствами СППР многосекционного манипулятора параллельной структуры для управления ориентацией космического телескопа “Миллиметрон”

Федеральной космической программой России предусматривается создание космической обсерватории “Миллиметрон” (проект Спектр-М) с раскрываемой адаптивной антенной диаметром 10 м, работающей в диапазоне волн от 20 мкм до 20 мм [9]. Средствами СППР выполнен синтез геометрии одного из вариантов устройств для управления ориентацией антенны обсерватории.

В качестве секций манипулятора используем механизмы параллельной кинематики типа гексапод (платформа Стюарта), общее число которых из соображений надежности и простоты управления не должно превышать пяти. Полагаем, что для минимизации веса манипулятора платформы гексаподов изготавливаются в виде равносторонних треугольников со срезанными вершинами из трубчатого углепластика прямоугольного сечения. Штанги гексаподов могут быть двух- и трехсоставными (то есть, состоять из двух или трех полуштанг) и изготавливаются также из указанного углепластика. Манипулятор должен обеспечивать ориентацию антенны обсерватории в пределах полусферы, ось симметрии которой совпадает с продольной осью симметрии манипулятора (и КА в целом). Антенна должна отстоять от первой платформы манипулятора не менее чем на 500 мм (Рис. 2).

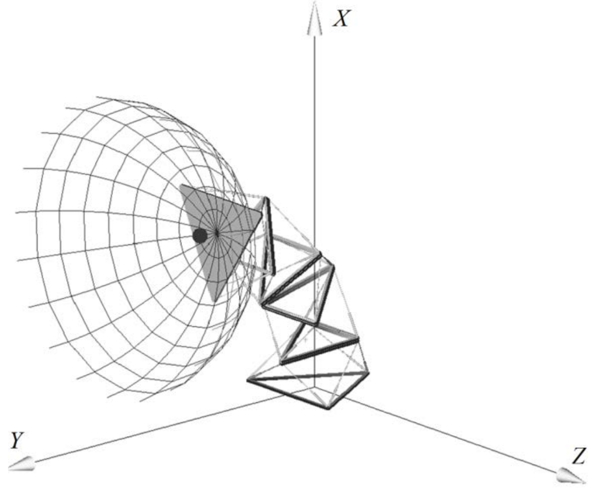


Рис. 2. Модель манипулятора и антенны

Средствами СППР получены длины штанг и размеры секций манипулятора, которые удовлетворяют указанным выше ограничениям; выполнен синтез траекторий требуемых движений антенны обсерватории. Для проверки корректности полученных результатов выполнено моделирование и анализ механизма манипулятора в системе *NX*.

Заключение

Разработаны методы структурного синтеза многосекционного МТХ, включающие в себя определение оптимальной формы секций и их размеров для различных критериев оптимальности и видов нагружения манипулятора; методы планирования конфигурации и синтеза траектории движения МТХ при наличии и отсутствии препятствий, в том числе, метод решения задачи синтеза траектории движения манипулятора, основанный на комбинации оптимизационного и геометрического подходов. Предложена структура СППР *TRUNK* для автоматизированного синтеза геометрии многосекционного МТХ. Выполнена программная реализация системы. В рамках проекта космической обсерватории Миллиметрон (проект Спектр-М) с помощью СППР осуществлен синтез манипуляторов с разными типами платформ; решена задача синтеза траектории движения манипулятора для различных режимов позиционирования антенны обсерватории.

1. M. Nefzi, M. Riedel, B. Corves. Towards an automated and optimal design of parallel manipulators // Automation and Robotics, 2009, P.143–156.
2. Kinematic and dynamic analysis of the 2-DOF spherical wrist of orthoglide 5-axis / Raza Ur-Rehman, St´ephane Caro, Damien Chablat et al. // Troisi`eme Congr`es International. Conception et Mod´elisation des Syst`emes M´ecaniques, 3rd International Congress Design and Modelling of Mechanical Systems CMSM, Hammamet, Tunisia, 2009, March 16–18, P.1–8.
3. A. Klimchik, A. Pashkevich, D. Chablat. CAD-based approach for identification of elasto-static parameters of robotic manipulators // Finite Elements in Analysis and Design, 2013, V.75, P.19–30.

4. N. Tlale, P. Zhang. Teaching the design of parallel manipulators and their controllers implementing MATLAB, Simulink, SimMechanics and CAD // International Journal of Engineering Education, 2005, V.21, No.5, P.838–845.
5. Л. Рыбак, А. Чичварин А. Моделирование динамики манипулятора-трипода с шестью степенями подвижности // X всероссийская научно-практическая конференция с международным участием “Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Энергосбережение. Экология. Новые технологии”, г. Старый Оскол, 2013, 25–27 ноября, Т.II, С. 87–91.
6. K. Mekhnacha, E. Mazer, P. Bessiere. The design and implementation of a Bayesian CAD modeler for robotic applications // Advanced Robotics, 2001, V.15, No.1, P. 45–69.
7. С.В. Волкоморов, А.П. Карпенко. Оптимизация геометрии многосекционного манипулятора типа хобот // Мехатроника, автоматизация, управление, 2012, №3, С.23–27.
8. А.П. Карпенко, Е.Ю. Селиверстов. Глобальная оптимизация методом роя частиц. Обзор // Информационные технологии, 2010, № 2, С.25-34.
9. W. Wild, N.S. Kardashev. Millimetron - a large Russian-European submillimeter space observatory // Exp Astron, 2009, V.23, P.221-244.

Ya. Kalinin, E. Briskin

ON THE FORMATION OF THE MOBILE ROBOT'S "CHARACTER" AS ELEMENT OF "INTELLIGENT" CONTROL

Volgograd State Technical University, Russia
dtm@vstu.ru

Я.В. Калинин, Е.С. Брискин

О ФОРМИРОВАНИИ «ХАРАКТЕРА» МОБИЛЬНОГО РОБОТА КАК ЭЛЕМЕНТА «ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО» УПРАВЛЕНИЯ *

ВолгГТУ, г. Волгоград
dtm@vstu.ru

Введение

Создавая новые машины и механизмы, человек вольно и невольно пытается повторить принципы функционирования живых организмов, выбирая конструкционные решения копирующее те, что уже созданы природой и в процессе эволюции получили законченный вид. Так известные шагающие движители [1 – 5] применяемые в мобильных роботах в той или иной степени копируют конечность обитателей животного мира (рис. 1). В частности антропоморфная схема в какой-то степени копирует ногу человека, «лошадиная» и инсектоморфная схемы – ноги животных и насекомых, соответственно. Ортогональные и пантографные схемы – это попытки модернизации «природных» схем. В зависимости от механизма шагания как движитель, так и сам робот могут иметь различное число степеней свободы, что оказывает влияние на возможность реализации тех или иных движений.

Это, в свою очередь, определяет потенциальные показатели качества робота: скорость движения, проходимость, маневренность, энергоэффективность и др. [6] Однако, большинство реализуемых показателей зависит не только от конструктивных особенностей, но и от алгоритмов управления роботом. Можно разрабатывать различные алгоритмы управления, отдавая предпочтение, по важности, тому или иному показателю. Так один и тот же робот, в зависимости от решаемой задачи, может перемещаться из одного заданного положения в другое различным образом. Например, двигаться он может обеспечивая минимум тепловых потерь в двигателях или минимум развиваемой мощности, или минимум пройденного расстояния, или минимум (максимум) других показателей (минимум ускорения центра масс, минимум усилий развиваемых приводами, максимум скорости и др.) [7].

Если система управления роботом позволяет самому роботу определять свое программное движение, обеспечивающие выполнение того или иного показателя или их комбинации, то реализуется один из элементов «интеллектуального» управления. Относительно искусственного интеллекта, вообще и интеллектуального управления, в частности, имеются различные суждения [8 – 12]. Но если пользоваться этим понятием для робота, то можно воспользоваться и другим понятием,

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 14-08-01002 а, № 14-01-00655 а, 14-08-31214 мол_а.

характеризующим интеллектуальные особенности человека – «характер» мобильного робота. Действительно, можно считать, что «характер» – это набор весовых коэффициентов k_1, k_2, …, k_N, характеризующих значимость показателей H_1, H_2, …, H_N движения для каждого конкретного робота. Таким образом, можно сопоставить некоторые черты характера человека - некоторым техническим показателям движения мобильного робота (Таблица 1).

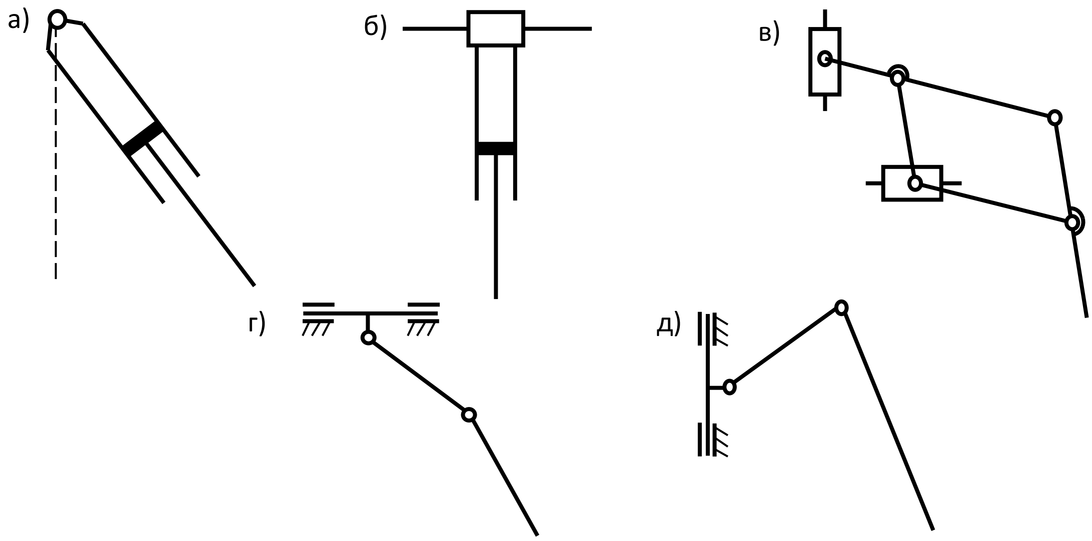


Рис. 2. Схемы шагающих движителей: а) телескопическая, б) ортогональнальная, в) пантографная, г) «лошадиная», д) инсектоморфная.

Таблица 1

Сопоставление «черт характера» человека и мобильного робота

Черты характера человека	Весовой коэффициент	Технический показатель мобильного робота	Обозначение
Бережливость	K_1	Тепловые потери в двигателях	H_1
Деликатность	K_2	Комфортабельность движения	H_2
Быстрота	K_3	Время перемещения из начального положения в конечное	H_3
Упорство	K_4	Усилия, развиваемые приводами	H_4
Активность	K_5	Путь, пройденный мобильным роботом из начального в конечное положение	H_5

Таблица 1 не претендует на полноту, дискуссионна и может быть пересмотрена, а представлена только для того, чтобы интеллектуальные особенности человека можно было как-то соотносить с техническими характеристиками мобильного робота, а при эксплуатации оператором средней квалификации он мог бы, как и водитель современного автомобиля с автоматической коробкой перемены передач (АКПП) устанавливать «характер» движения селектором выбора режимов АКПП (нормальный, спортивный, экономичный, зимний, режим пониженных передач и др.) не задумываясь о достижении тех или иных показателей и выбора конкретных значений весовых коэффициентов k_1, k_2, …, k_N. Многие образцы современной сложной бытовой техники (стиральные машины-автоматы, сотовые телефоны и т.п.) также имеют различной ширины диапазоны изменения основных параметров работы, которые могут называться по-разному: режимы, программы, а могут быть определены как «характер».

1.Постановка задачи

Как правило, движение робота должно быть организовано так, чтобы в той или иной степени обеспечивался несколько показателей. Этого можно добиться, если ввести критерии качества:

$$I = \sum k_j H_j \,, \tag{1.1}$$

и потребовать его минимума на заданном интервале движения. Показатели качества H_j, как правило, являются линейными функционалами от тех или иных функций f_j , определяемых механическим состояние мобильного робота:

$$H_j = H_j\left(f_j\right) \tag{1.2}$$

где H_j – линейный оператор, задающий изображение пространства функции на множестве вещественных чисел. Функции f_j могут быть произвольными функциями обобщенных координат механической системы и их производных. Например, критерий тепловых потерь в двигателе представляет собой интеграл за время движения τ от квадрата момента M, развиваемого двигателем:

$$H_M = \int_0^\tau f_M dt = \int_0^\tau n_M M^2 dt \tag{1.3}$$

где n_M – нормирующий коэффициент.

Ставится задача разработки метода автоматического определения программного движения мобильным роботом в зависимости от его «характера» определяемого весовыми коэффициентами k_j. Предполагается, что перед эксплуатацией робота в конкретной эксплуатационной ситуации оператор формирует его «характер», как водитель автомобиля с АКПП.

Поскольку даже для человека достаточно трудно количественно оценить черты характера, в поставленной задаче оценка производится на трех уровнях. Каждый из весовых коэффициентов изменяет значение 0,1; 0,5; 1. Например, для бережливости 0,1 соответствует расточительности, 0,5 – умеренной бережливости, 1 – высокой бережливости. Для тепловых потерь: 0,1 – тепловые потери практически не имеют значения, а 0,5 и 1 – соответственно тепловые потери достаточно важны и очень важны.

При этом существенным является то, что важны не абсолютные значения весовых коэффициентов, а их соотношения между собой.

2. Методы решения

В основе методов решения поставленной задачи лежит известные методы решения экстремальных задач: определение максимумов и минимумов функции, определение экстремумов функционалов как безусловных, так и условных (изопериметрические условия). Причем могут быть использованы как точные аналитические вариационные методы, так и приближенные, где экстремум находится на определенном классе функций.

Могут быть использованы и другие методы, как правило численные, основанные на целенаправленном переборе уравнений движения мобильного робота, например на многомерных кубах [13].

3. Примеры влияния «характера» мобильного робота на управление его программным программного движения

<u>3.1 Задача прокладки трассы</u>

Мобильный робот перемещается из точки O в точку C. Положение точки C относительно точки O задается длинами отрезков L (OB) и h (BC) и определяется информационно-измерительной системой (рис. 2). При перемещении по отрезку прямой OB (шоссе) его скорость $V = u_1$, при движении по любой другой кривой (пересеченная местность) его скорость $V = u_2$.

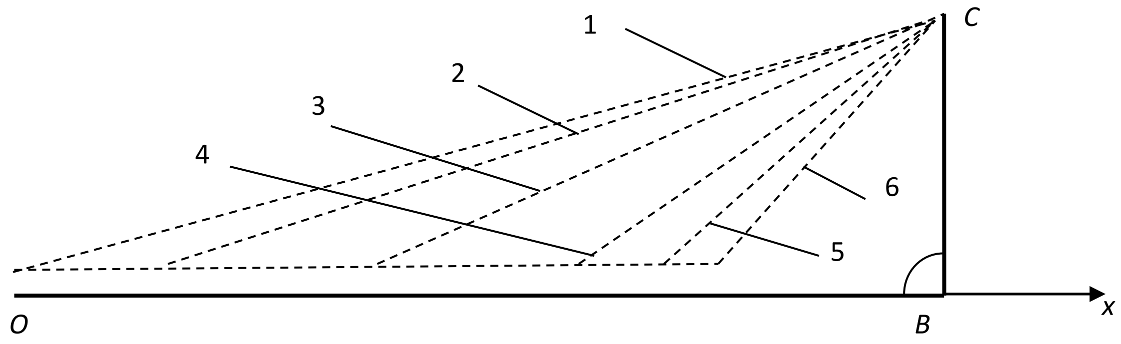


Рис. 2. Траектории движения роботов с различными «характерами»

Система управления роботом решает задачу минимизации функции

$$I = k_5 \frac{S}{u_j} + k_4 \tau \tag{3.1}$$

В (3.1) введена постоянная скорость u_j для приведения весовых коэффициентов «характера» робота к единой размерности.

Для этого робот решает задачу определения координаты *x*, когда необходимо свернуть с шоссе и идти по пересеченной местности:

$$\frac{dI}{dx} = 0 \tag{3.2}$$

Решение уравнения (3.2) имеет вид

$$x = L - \frac{h}{\sqrt{\left(\frac{\alpha k_5 + k_4}{\alpha\left(k_5 + k_4\right)}\right)^2 - 1}} \tag{3.3}$$

Для удовлетворения физическому смыслу задачи необходимо, чтобы

$$\begin{cases} u_2 < u_1, \\ \frac{\alpha\left(k_5 + k_4\right)}{\alpha k_5 + k_4} < \frac{L}{\sqrt{L^2 + h^2}}, \end{cases} \tag{3.4}$$

где $\alpha = u_2/ u_1$.

На Рисунке 2 представлены траектории движения робота с различными «характерами». При этом так как две рассматриваемые «черты характера» имеют три уровня изменения каждая, что дает 9 возможных сочетаний соотношений весовых коэффициентов, из которых в рамках данной задачи получается 6 различных сочетаний.

Это соответствует: 1 - активно-небыстрому или неактивно-небыстрому «характерам»; 2 - неактивно-быстрому «характеру»; 3 - очень активно-небыстрому, активно-быстрому или неактивно-очень быстрому «характерам»; 4 - активно-очень быстрому «характеру»; 5 - очень активно-быстрому «характеру»; 6 - очень активно-очень быстрому «характеру».

Если условия (3.4) не выполняются, то робот выбирает прямолинейное движение вдоль *OC*. Это соответствует такому сочетанию «черт характера» робота, при которых приоритет пройденного пути оказывается выше затрат времени настолько, что выбирается кратчайший путь. В рассмотренном случае - это высокий или средний профессионализм и низкая расторопность робота.

3.2 Комфортабельное движение робота с максимальной скоростью

Мотивированное движение робота является прямолинейным с остановкой через промежуток времени τ. Мотивация осуществляется другими элементами «интеллектуального управления», которые не рассматриваются, например, не рассматривается информационно-измерительная система. «Характер» робота задается весовыми коэффициентами (таблица 1).

Робот формирует своё программное движение на основе минимума функционала

$$I = k_3\int_0^\tau \dot{V}^2 dt - k_5\int_0^\tau V dt \tag{3.5}$$

Здесь минимум первого интеграла обеспечивает минимальное среднеквадратичное ускорение, а второй, с учётом знака, максимум пройденного пути роботом за время τ.

Уравнение Эйлера в этом случае имеет вид

$$2k_3\ddot{V} + k_5 = 0 \tag{3.6}$$

Решение уравнения (3.6) должно удовлетворять граничным условиям

$$V\left(0\right) = V\left(\tau\right) = 0 \tag{3.7}$$

откуда скорость робота

$$V = \frac{-k_5}{4k_3}t^2 + \frac{k_5\tau}{4k_3}t = \frac{k_5 t}{4k_3}\left(\tau - t\right), \tag{3.8}$$

а путь *S* пройденный роботом за время τ определяется

$$S = \frac{k_5}{24k_3}\tau^3 \tag{3.9}$$

На рисунке 3 представлены графики скорости для роботов с различными «характерами».

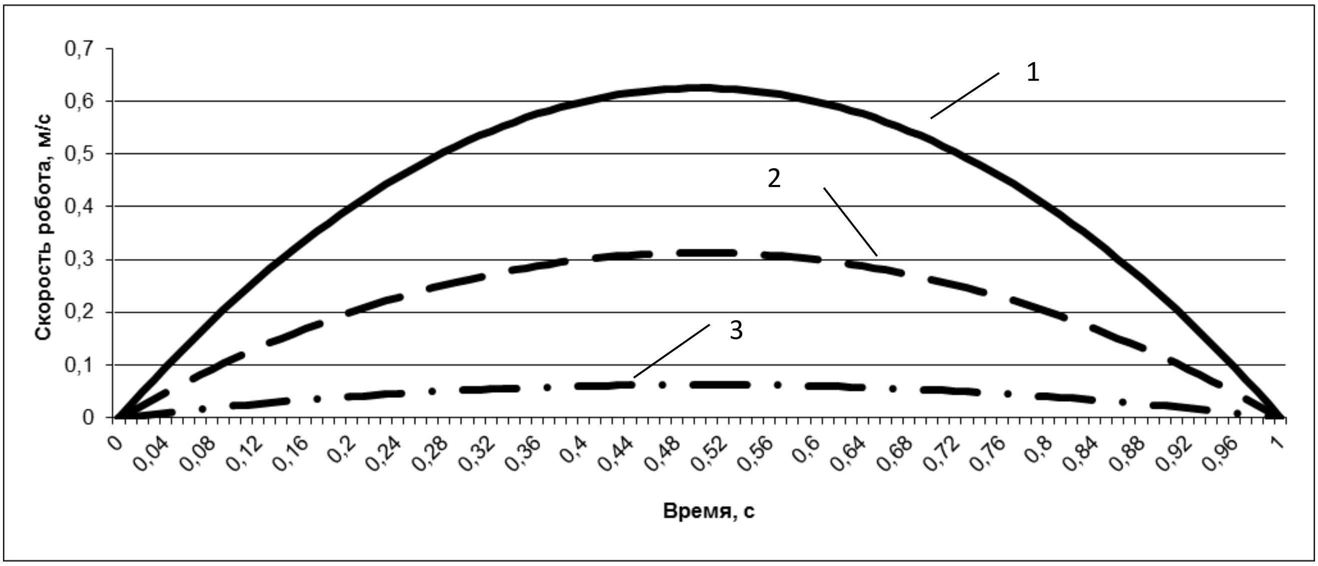


Рис. 3. Графики скорости для роботов с различными «характерами» 1 - $k_3 = 1$, $k_5 = 10$; 2 - $k_3 = 1$, $k_5 = 5$; 3 - $k_3 = 1$, $k_5 = 1$

Чем больше соотношение k_6/k_3, тем круче парабола и больше изменение скорости в пределах периода движения, а, следовательно, и больший путь проходит робот (3.9). При этом робота с «характером», соответствующим кривой 1 можно назвать неделикатно-очень активным, а роботов с «характерами», соответствующими кривым 2 и 3 - деликатно-активным и очень деликатно-неактивным соответственно.

Заключение

Вводимый элемент интеллектуального управления, определяемый как его «характер» позволяет мобильному роботу самостоятельно формировать программное движение и, следовательно, осуществлять требуемое управление приводами. «Характер» мобильного робота определяется набором весовых коэффициентов $k_1, k_2, \ldots, k_N$. Программное движение определяется в результате решения экстремальных задач и является Парето оптимальным в независимости от «характера» мобильного робота. «Характер» мобильного робота может быть изменен человеком-оператором или самим роботом в процессе самообучения, если, например, хотя бы один из показателей выходит за рамки допустимых значений.

1. Охоцимский, Д.Е. Шагающие машины [Текст] / Д.Е. Охоцимский, А.К. Платонов, А.А. Кирильченко, В.В. Лапшин // Препринт Ин-та прикл. матем. АН СССР. М., 1989. 36 с.
2. Брискин, Е.С. Динамика и управление движением шагающих машин с цикловыми движителями: монография [Текст] / Е.С. Брискин, В.В. Жога, В.В. Чернышев, А.В. Малолетов; под ред. Е.С. Брискина // - М.: Машиностроение, 2009. - 191 с.
3. Брискин, Е.С. Концепция проектирования, динамика и управление движением шагающих машин. Ч.1. Концепция проектирования. [Текст] / Е.С. Брискин, В.В. Чернышев, В.В. Жога и др. // "Мехатроника, Автоматизация, Управление" №5, 2005, с. 22 – 27.
4. A.P. Bessonov, N.V. Umnov, V.V. Korenovsky, E.E. Silvestrov and S.V. Khoborkov. Six Link Mechanism for the Legs of Walking Machines // 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. – C. 347-354.
5. Павловский, В.Е. О разработках шагающих машин [Текст] / В.Е. Павловский // Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша. 2013. №101. С. 1-32.
6. Брискин, Е.С. Сравнительный анализ колёсных, гусеничных и шагающих машин [Текст] / Е.С. Брискин, В.В. Чернышев, А.В. Малолетов, Н.Г. Шаронов // Робототехника и техническая кибернетика. – 2013. – № 1. – С. 6 – 14.
7. Брискин, Е.С. О прикладных экстремальных задачах с комплексным критерием качества [Текст] / Е.С. Брискин, Я.В. Калинин, А.В. Леонард, А.В. Малолетов // Сборник материалов XII всероссийского совещания по проблемам управления ВСПУ-2014/ ИПУ РАН. – М., 2014. - С. 2184-2195.
8. Винер, Н. Кибернетика или управление и связь в животном и машине [Текст] / Н. Винер / - М.: Наука, 1983. - 344 с.

9. Юревич, Е.И. Групповая робототехника - основа развития искусственного разума [Текст] / Е.И. Юревич // Робототехника и техническая кибернетика. ЦНИИРТК. - СПб, 2014. №1 (2). С. 16-17.
10. Ющенко, А.С. Интеллектуальное планирование в деятельности роботов [Текст] / А.С. Ющенко // "Мехатроника, Автоматизация, Управление" №3, 2005, с. 5 – 7.
11. Васильев, С.Н. Интеллектуальное управление динамическими системами [Текст] / С.Н. Васильев, А.К. Жарков, Е.А. Федосов, Б.Е. Федунов // – М.: Физматлит, 2000. - 352 с.
12. Кориков, А.М. Искусственный интеллект в технических системах [Текст] / А.М. Кориков // Сборник материалов XII всероссийского совещания по проблемам управления ВСПУ-2014/ ИПУ РАН. – М., 2014. - С. 3888-3896.
13. Соболь, И.М. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями [Текст] / И.М. Соболь, Р.Б. Статников // – М.:Дрофа, 2006. – 176 с.

S. Karpov, P. Tripolski

MODELS AND ALGORITHMS FOR ORGANIZING AND MAINTAINING COMMUNICATIONS IN MULTI-AGENT ROBOTIC SYSTEM

MIREA, Moscow, Russia
s_karpov@mirea.ru

Introduction

Multi-agent systems have become one of the most promising branches of robotics in recent years. Such system consist of several autonomous intelligent robots (called agents) that perform the task. Multi-agent robotic systems (MARS) can be used to solve difficult tasks which impossible to solve with a single agent. The most important applications of MARS are promising applications for military orspecialpurposes.

Development MARS puts the researchers a lot of different problems, such as the cooperation and coordination of agents, organization, communication between robots, coordination, distributed problem solving, multiagent learning, system reliability, fault tolerance, etc. One of the most important problems is the union of all intelligent agents a single wireless network, ie, maintaining connectivity of the system. The effectiveness of MARS depends on this problem. We should connect robots included this system, you must associateto avoid collapse and errors during the taskIf the system is not connected.

The solution for this problem is a very important todevelopMARS, because algorithms cooperation and coordination of agents, communication between robots, matching algorithms and distribution of tasksdirectly dependentfrom him. Also incorporated models and algorithms may affect the decision of the parallel tasks associated with the development of Mars, such as the evaluation of the effective number of intelligent agents in group.

This paper propose to consider the problems identified as a set of two subproblems: hardware-technological problem and the problem of ensuring coherence and restore connectivity. Solution of the first sub-problems largely depends on the choice of technologies of communication.

The decision of the second subproblem involves group control algorithmsdevelopment. The ensuring coherence problem involves the development of algorithms for adjusting the whole system behavior to integrate the robots into the network, based on the algorithm of prediction provisions for robots and algorithms to predict the availability of connectivity as a result of certain actions. This problem solutionsimplies a redistribution of tasks between the algorithms agents.

We assume that you are using a multi-agent system consisting of a universal robot number 5 - 50 units in this paper. In case of the autonomous agents will be free to perform main MARS task set before, you can choose robots and assign them communicators - robots from among these robots, whose main task will be to ensure the link. And thenyou can organize additional channels use the remaining robots in order to improve the quality of communication. Otherwise, if there is no available robots, the restoration of relatedness is possible only by rebuilding and redistribution tasks, which causes delays in the overall system.

The problem of providing connectivity groups

Under the task of ensuring cohesion refers to the determination of the entire system agents such arrangement in space, where they form a single network. Andcommunication between any two nodes can be set directly or through other intermediary nodesin this network. It is required to determine the most efficient way to combine all the network agents to ensure the coherence of multi-agent group.

First of all, you need to develop an algorithm that allows to determine whether it is possible communication between multiple robots and otherwise determine the coordinates of the robot signalers. This algorithm will be the basis for the next stages, passing, as an "input" desired "ideal" alignment.

The most important thing for algorithm of providing connectivity robot system is requirement that it must be fast and resource-intensive, since the agents belonging to the group have high mobility and limited computing power. It should also take into account the current situation and the number of robots, as well as restrictions of the selected communications technology. The most important of them is limiting the communication range between the two robots. In addition, the selected communication technologies depends on the noise immunity, communication range, transmission speed communications.

The reliability of the channel characterized by the ratio of signal power to interference power. Since signal power increases with the square of the distance approaching the signal source, then we can enter a correction factor which, when multiplied by the radius of the range we get a guaranteed connection. This ratio can be calculated empirically or choose a specific task in the simulation[1].

Possible solutions to ensure connectivity problems

We encourage to use the mathematical apparatus - the theory of graphs - to solve this problem. Initially the formulation of the problem looks like searching for the shortest paths in a graph in which the vertices of the graph correspond to the autonomous agent, and the edges between them correspond to a possible means of communication between agents. Graph theory suggests two solutions: the construction of the minimum spanning tree, that is, Count the ways of finding the minimum by selecting the edges in the graph full mesh, and the construction of Steiner tree, ie, Graphing minimal paths of new edges by adding auxiliary components.

The second method is more accurate than the first and corresponds to the condition much more, but it is more time-consuming. There are several algorithms for solving the Steiner problem, the most popular isMelzak algorithm [2], which examines possible connections between points and many possible arrangements of Steiner points. But the main problem of these algorithms - enormous amount of time and facilities [3], due to the fact that for all of these programs while solving the problem may vary depending on the geometry and the number of points. Moreover, the computation time for even the most sophisticated algorithms grows exponentially with the number of points, and the Steiner problem for a large number of points are virtually insoluble.

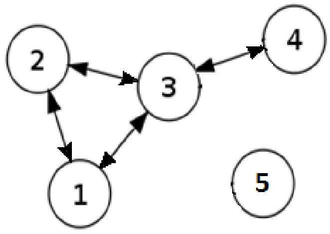
Thus, the use of known Steiner problem algorithms is unacceptable. However, X. E. Gilbert and H. Pollak suggested that the ratio of the length of the shortest Steiner tree to the length of the minimum spanning tree is like the least, $\sqrt{3} / 2$in studies of the Steiner problem. SoSteiner tree is no more than 13.4% shorter than the minimum spanning tree [5]. It allows us to offer the following: definition of ways of organizing connectivity agents robot system can be carried out as follows - first construct a minimum spanning tree, and then (if possible) it should be simplified by additional constructions. As a result, alignment algorithm agents for connected network must include the following steps (flowchart is shown in Fig. 1):

– connectivity network of agents graph calculation and presenting it in the form of adjacency matrixes
– a matrix of relatedness calculation
– Identify the components of connectedness
– Determine the shortest distance between the components and the construction of additional bonds
– Simplification of the resulting graph (optimization by introducing additional links)
– Identify coordinates for the new robot repeaters

Prepared algorithm

Simulation of communication between the agents used with the graphs in this algorithm. Information about each robot connections is stored in the adjacency matrix. G_c graph adjacency matrix (Fig. 2.a) with a finite number of vertices n (numbered from 1 to n) is a square matrix E of size n, wherein the value of the element a_{ij} is equal to the number of edges from the i-th vertex to the j-th vertex (in this case, aij = 0 or 1, because communication is either there or not). Thus if the robot is located i to its neighbor j, smaller than the radius of the connection, the aij = 1 (Fig. 2.b)in our case.

Reachability matrix based on a matrix of the adjacency matrix. Reachability matrix of graph $G_c$with finite number of vertices n (numbered from 1 to n) is a square matrix E^* sizes n. The value of the element a_{ij} is 1 if the vertex jis reachable from the vertex of i (Fig. 2.c). In this case, the matrix element $a_{ij}$is equal 1 if there is a link between i and j robots, may be using several other robots. Reachability matrix shows who can contact this robot, either directly or through its neighbor. Andit is obtained by adding the to the adjacency matrixvertices of robots, which can communicate via the neighbors.



a)

б) $E = (\blacksquare(1\&1\&1\&0\&0@1\&1\&1\&0\&0@1\&1\&1\&1\&0@0\&0\&1\&1\&0@0\&0\&0\&0\&1))$

в) $E^{\intercal} \ast= (\blacksquare(1\&1\&1\&1\&0@1\&1\&1\&1\&0@1\&1\&1\&1\&0@1\&1\&1\&1\&0@0\&0\&0$

Fig.1. The flowchart providing connectivity

Fig.2. a) Graph G_cb) adjacency matrix for G_c; c)reachability matrix for G_c

Further, according to the algorithm (Fig. 1) it is necessary to determine the connectednesscomponents of a graph.By definition, it is a set of vertices by rule: there is a path from any vertex of this set to another, and there is no way out to the vertex not included in it. According to our problem, connectedness component is a group of vertices that corresponds to robots,which are connected to each other, including via intermediate agents and are not connected with others. Thus, if there is the only one component connectivityat any given time, we can say that all the robotsare linked. Otherwise, we must connect the existing components of connectedness using most rational way for this situation.

According to the algorithm, the next steps are to determine the shortest distance between the components and agents belonging to different components. We will use a modified algorithm Prima in order to find ways of combining the various components of connectedness. Standard Prim algorithm is an algorithm for constructing a minimum spanning tree of a weighted connected undirected graph, ie, construction of full mesh graph associated shortcuts. Modification of the algorithm should be done due to the fact that optimal (for us) path can be different from the shortest path. To determine the optimal paths can be used a variety of conditions:

- distance between the robot according to extreme vertices of the edge should be the shortest;
- the least possible number of support robots should be used to create communication between robots corresponding to the two extreme verticies of the edge;
- Adding selected edge to the overall graph should help to simplify the graph in the future;
- *etc*

In the proposed approach the best ways selection is carried out by assigning potential specific numerical evaluation for each edge of the graph. That number depends on the conditions listed above. The amount assigned to the balls is the weight of an edge, which is then used Prim's algorithm for finding the optimal connections.

Then resulting graph should be simplified through the introduction of additional peaks in the graph in order to engage in communications as little robots as possible. These additional peaks are intersections that will fit an auxiliary robot-repeater. We use the ribs alternate viewing and identifying subgraphs consisting of three main peaks.It’s possible to set limits on the basis of the conditions of the Steiner problem [4] and the properties of the Steiner points to reduce the resource intensity of the system and increase the speed of the algorithm. If the angle near medium vertexof three vertices from the chosen subgraph is more than 120 degrees, the search for possible reorganization of the connection is not produced, otherwise use the algorithm for solving the Steiner three points (Fig. 4).

The result of the algorithms described above is an array of edges and vertices that you should add to obtain a full mesh count. Rib is stored in memory as two vertices defining the edge and its length. Vertices are defined as a pair of coordinates. Thus, it’s necessary to make an array of robot’s location coordinates to complete the operation of the algorithm (fig.1). We can make this array by computing coordinates of the vertices forming the edge by edge’s fragmentation into pieces smaller than or equal to the radius of communications.

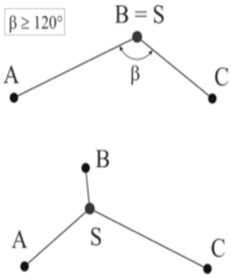


Fig.3. Solution of the Steiner tree problem for three points

Network connectivity is checked at each clock cycle of the system. In the absence of communication between some of its agents, as well as their number is insufficient in the system may experience significant delays. Thus the results of the program prepared by the proposed algorithm, we can get an array with information about the link between all the robots and an excess (the presence of a fully free agents), or lack of auxiliary agents on which to draw conclusions about the effectiveness of the task.

The proposed algorithm allows to define rational distribution of agents in any given time. The next step in solving the problem of ensuring coherence is to determine ways to move the agents from the current position in the specific optimal connection without loss. Algorithms redistribution of tasks between agents and algorithms to maintain connectivity are required to achieve this goal.

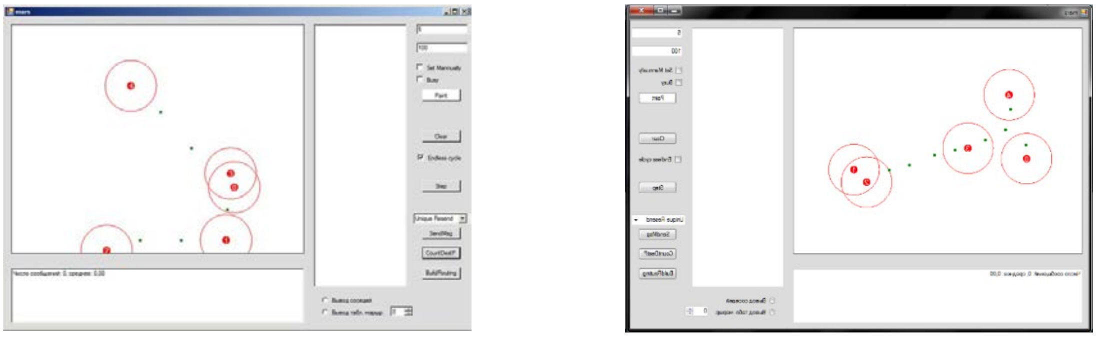


Fig.4 . Modeling the behavior of Mars. Red marked robots employed directly perform the tasks.Green marked robots communicators

Maintaining connectivity in a multi-agent system is based on the prediction of the upcoming situation in the working area of MARS and subsequent identification of possible actions of the multiagentsystem.An analysis of the possible applications of MARS shows the possibility of exceptions. Thesesituationsinclude:

• "Tears" - a situation in which there is a relationship between two robots, but robots are moving in the opposite direction

• "Connection» - a situation in which there is no connection between the two robots, but robots are moving in the oncoming direction

• "overload" - a situation where passing through the unit delays occur because of the large number of messages

• "downtime» - a situation in which the node does not pass through any communication, except posts this robot

Obviously, the situation 1 and 3 require the use of additional (free from tasks) agents, situations 2 and 4 allow release agents from the current task. The definition of such situations is possible on the basis of the coherence matrix described in the previous section, and data on planned activities of each agent. The proposed method consists of three steps: analysis of the matrices and data; check the identification of specific situations, the decision to change the sequence of execution tasks.

Conclusion

This work is devoted to the task of organizing and maintaining communications in multi-agent systems. Algorithms of connecting intelligent agent of multi-agent robotic system a single wireless network are given. A possible implementation of the algorithm determining the relatedness of robots and search for possible ways to combine the agents into a single network are shawn. The algorithms maintain connectivity and risk prediction breaks are given.

The results form the basis of the software (Figure 4), which allows you to simulate the behavior of multi-agent robotic system with a given number of robots to evaluate the link at any time to accomplish the tasks of MARS, determine the coordinates of auxiliary robots to be added (or reassign available) to restore connectivity.

The results of this researchcan be used in assessing the effectiveness of the number of groups of agents in multi-agent robotic system, as well as planning movements and the allocation of tasks.

1. Multi-sensor ATTenuation Estimation (MATTE): Signal-strength prediction for teams of robots, Johannes Strom and Edwin Olson, U.S. DoD Grant FA2386-11-1-4024.Department of Computer Science and Engineering, University of Michigan, Ann Arbor, MI 48109 USA
2. Задача Штейнера.-[Электронный ресурс].-Режим доступа: http://ru.wikipedia.org/wiki/Задача_Штейнера, свободный.- Загл. с экрана
3. А. О. Иванов, А. А. Тужилин Теория экстремальных сетей. — Москва–Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2003. — ISBN 5-93972-292-X.
4. А. О. Иванов, А. А. Тужилин Задача Штейнера на плоскости или плоские минимальные сети // Матем. сб.. — 1991. — Т. 182. — № 12. — С. 1813–1844.
5. Алгоритмы о выборе дороги и сетях. Сети Штейнера. Лекция Владимира Протасова в Яндексе.-[Электронный ресурс].-Режим доступа: http://habrahabr.ru/company/yandex/blog/215931/, свободный.- Загл. с экрана
6. Модели и алгоритмы обеспечения связанности агентов мультиагентной робототехнической системы в беспроводной сети, «Успехи современной радиоэлектроники» издательства «Радиотехника», №3, с201-206, 2015

С.А. Карпов, П.Э. Трипольский

МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ ОРГАНИЗАЦИИ И ПОДДЕРЖАНИЯ СВЯЗИ В МУЛЬТИАГЕНТНОЙ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Московский государственный технический университет радиотехники, электроники и автоматики (МИРЭА), Москва
s_karpov@mirea.ru

Введение

Многоагентные системы стали одной из наиболее перспективных ветвей развития робототехники в последнее время. Это системы, состоящие из нескольких агентов – автономных интеллектуальных роботов, совместно выполняющих поставленную задачу. Многоагентные робототехнические системы (МАРС) могут быть использованы для решения таких проблем, которые сложно или невозможно решить с помощью одного агента или монолитной системы. Наиболее важными перспективными применениями МАРС являются применение в военных целях или для решения задач специального назначения.

Разработка МАРС ставит перед исследователями множество различных проблем, таких как кооперация и координация агентов, организация, коммуникация между роботами, согласование, распределенное решение задач, мультиагентное обучение, надежность системы и устойчивость к сбоям. Одной из первостепенных задач, от которой зависит эффективность работы МАРС, является объединение всех интеллектуальных агентов единой беспроводной сетью, т.е. обеспечение связанности системы. В случае, если система не связанна, то роботов, входящих в эту систему, необходимо связать, иначе это может привести к коллапсам и ошибкам в ходе выполнения задания.

Решение этой проблемы является очень важным шагом при разработке МАРС, т.к. от него напрямую зависят алгоритмы кооперации и координации агентов, коммуникация между роботами, алгоритмы согласования и распределения задач. Также заложенные модели и алгоритмы могут повлиять на решение параллельных задач, связанных с разработкой МАРС, таких, например, как оценка эффективной численности группировки интеллектуальных агентов.

В данной работе предлагается рассматривать обозначенную проблему как совокупность двух подпроблем: аппаратно-технологическая проблема обеспечения связанности и проблема обеспечения и восстановления связанности. Решение первой из этих подпроблем, в большей степени, зависит от выбора технологии организации связи.

Решение второй подпроблемы подразумевает разработку алгоритмов группового управления. Задача обеспечения связности подразумевает разработку алгоритмов корректировки поведения всей системы с целью объединения роботов в сеть, основываясь на алгоритмах прогнозирования положений роботов, и алгоритмов прогнозирования наличия связанности в результате определенных действий системы. В том числе решение обозначенной проблемы подразумевает наличие алгоритмов перераспределения задач между агентами.

В данной работе подразумевается, что используется многоагентная система, состоящая из универсальных роботов, численностью 5 – 50 единиц. В случае, если часть автономных агентов будут свободны от выполнения задачи, поставленной перед МАРС, из числа этих роботов можно выбрать роботов и назначить их связистами – роботами, главной задачей которых станет обеспечение канала связи. А затем с помощью оставшихся можно организовать дополнительные каналы с целью повышения качества связи. В противном случае, если свободных роботов нет, то восстановление связанности возможно только за счет перестроений и перераспределения задач, что вызывает временные задержки в работе всей системы.

Задача обеспечения связанности группировки

Под задачей обеспечения связанности всей системы понимается определение такой расстановки агентов в пространстве, при которой они образуют единую сеть, в которой связь между двумя любыми узлами может быть установлена напрямую, либо при помощи других узлов-посредников. Для обеспечении связанности многоагентной группировки требуется определить наиболее рациональный способ объединить все агенты сетью.

В первую очередь требуется разработать алгоритм, позволяющий определить возможна ли связь между несколькими роботами и в противном случае определить координаты роботов-связистов. Этот алгоритм послужит основой для следующих этапов, передавая, в качестве «входных данных» желаемую «идеальную» расстановку.

В первую очередь, алгоритм, обеспечивающий связанность робототехнической системы должен быть быстрым и не ресурсоемким, так как агенты, входящие в состав группировки обладают высокой подвижностью и ограниченными вычислительными мощностями. Также он должен учитывать текущие положения и количества роботов, а также ограничения, накладываемые выбранной технологией связи. Наиболее важное из которых - ограничение дальность связи между двумя роботами. Помимо этого, от выбранной технологии связи зависит помехоустойчивость, дальность связи, скорость передачи сообщений.

Надежность канала характеризуется отношением мощности сигнала к мощности помех. Т.к. мощность сигнала возрастает пропорционально квадрату расстояния с приближением к источнику сигнала, то мы можем ввести поправочный коэффициент, при умножение на который радиус мы получим гарантированный радиус связи. Этот коэффициент можно рассчитать или выбрать эмпирическим путем при моделировании конкретной задачи [1].

Возможные решения задачи обеспечения связанности

Для решения поставленной задачи предлагается использовать математический аппарат – теорию графов. Изначально постановка задачи напоминает поиск кратчайших путей на графе, в котором вершины графа соответствуют автономным агентам, а ребра между ними – возможным способам связи между агентами. Теория графов предлагает два решения: построение минимального остовного дерева, т.е. нахождения графа минимальных путей путем выбора ребер из полносвязанного графа, и построение дерева Штейнера, т.е. построение графа минимальных путей из новых ребер путем добавления вспомогательных узлов.

Второй способ обладает большей точностью по сравнению с первым и более соответствует условию задачи, но значительно более трудоемкий. Существует несколько алгоритмов решения задачи Штейнера, самый популярный из которых алгоритм Мелзака [2], вкотором рассматриваются возможные соединения между заданными точками и многие возможные расположения точек Штейнера. Но главная проблема всех этих алгоритмов – колоссальные затраты времени и мощностей[3], в связи с тем, что для всех этих программ время решения задачи может сильно зависеть от геометрии и от количества точек. Более того, время вычислений даже для самых изощрённых алгоритмов растёт по экспоненциальному закону с ростом числа точек, и задачи Штейнера для большого количества точек остаются практически неразрешимыми.

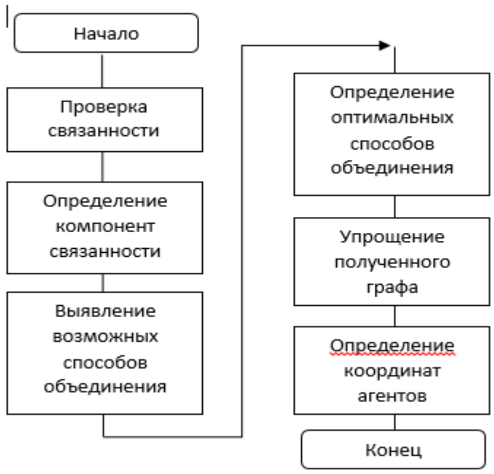
Таким образом применение известных алгоритмов задачи Штейнера – неприемлемо. Однако, в ходе исследований задачи Штейнера Е. Гилберт и Х. Поллак высказали предположение о том, что отношение длины кратчайшего дерева Штейнера к длине минимального остовного дерева равно, самое меньшее, $\sqrt{3}/2$, т.е. дерево Штейнера не более чем на 13,4% короче минимального остовного дерева [5]. Это позволяет предложить следующее: определение способов организации связности агентов в робототехнической системе может осуществляться следующим образом - сначала строится минимальное остовное дерево, а затем, если есть такая возможность, оно упрощается за счет дополнительных построений. В итоге алгоритм расстановки агентов для обеспечения связности сети должен предусматривать следующие этапы (БСА представлена на рис. 1):

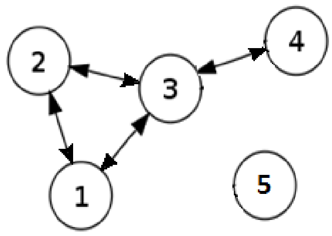
– формирование графа связанности сети агентов и представление его в виде матриц смежности;
– построение матриц связанности;
– определение компонент связанности;

– определение кратчайших расстояний между компонентами и построение дополнительных связей;
– упрощение полученного графа (оптимизация путем введения дополнительных связей);
– определение координат для новых роботов-ретрансляторов.

Представление полученного алгоритма

Моделирование связи между агентами в данном алгоритме происходит с помощью графов, а информация о связях каждого робота хранится в матрице смежности. Матрица смежности графа G_c (Рис. 2.а) с конечным числом вершин n (пронумерованных числами от 1 до n) представляет собой квадратную матрицу E размером n, в которой значение элемента a_{ij} равно числу рёбер (в нашем случае a_{ij}=1 или 0, т.к. связи либо есть, либо нет) из i-й вершины графа в j-ю вершину. Таким образом, в нашем случае, если робот i находится на расстоянии j от своего соседа, меньшем, чем радиус связи, то $a_{ij} = 1$ (Рис. 2.б).





а)

б) E = (■(1&1&1&0&0@1&1&1&0&0@1&1&1&1&0@0&0&1&1&0@0&0&0&0&1))

в) E^† *= (■(1&1&1&1&0@1&1&1&1&0@1&1&1&1&0@1&1&1&1&0@0&0&0

Рис. 1. Блок-схема алгоритма обеспечения связанности

Рис. 2. а) Граф G_c; б)Матрица смежности графа G_c; в)Матрица достижимости графа G_c

На основе полученной матрицы смежности строится матрица достижимостей Матрица достижимости графа G_c конечным числом вершин n (пронумерованных числами от 1 до n) представляет собой квадратную матрицу E^* размера n, в которой значение элемента a_{ij} равно 1, если из вершины i можно добраться в вершину j (Рис. 2.в). В нашем случае элемент матрицы a_{ij} будет равен 1 в случае если между роботами i и j есть связь, быть может через несколько роботов. Матрица достижимостейпоказывает, с кем связан этот робот как напрямую, так и через соседей, и получается путем добавления к матрице смежности вершин, связь с которыми возможна через соседей.

Далее, в соответствии с алгоритмом (Рис. 1) необходимо определить компоненты связности графа - такое множество вершин графа, в котором для любых двух вершин из этого множества существует путь из одной в другую, и не существует пути из вершины этого множества в вершину, не входящую в его состав. Применительно к нашей задаче компонентой связанности будет называться группа вершин, для которых соответствующие роботы будут связаны друг с другом, в том числе и через промежуточных агентов, и не связаны с другими. Таким образом, если в данный момент времени компонента связанности всего одна, то это означает, что все роботы связаны между собой. В противном случае необходимо соединить имеющиеся компоненты связанности, выбрав наиболее рациональный для этого способ.

Следующими шагами в работе алгоритма являются определение кратчайших расстояний между компонентами и агентами, входящих в различные компоненты связности. Для нахождения способов объединения различных компонент связанности будем использовать модифицированный алгоритм Прима. Стандартный алгоритм Прима – алгоритм построения минимального остовного дерева взвешенного связанного неориентированного графа, т.е. построение полносвязанного графа, связанного кратчайшими путями. Модификация алгоритма связана с тем, что оптимальные (для нас) пути могут отличаться от кратчайших. Для определения оптимальных путей могут использоваться различные условия:

– расстояние между роботами, соответствующими двум крайним вершинам одного ребра, должно быть кратчайшим;

– связь между роботами, соответствующими двум крайним вершинам одного ребра, должны обеспечивать как можно меньшее количество вспомогательных роботов;

– добавление выбранного ребра к общему графу должно позволять упростить граф в дальнейшем;

– и др.

Выбор оптимальных путей в предлагаемом подходе осуществляется за счет присвоения каждого потенциальному ребру графа определенной численной оценки, которая зависит от перечисленных ранее условий. Сумма присвоенных балов представляет собой вес ребра, который затем используется алгоритмом Прима для поиска оптимальных связей.

Затем, с целью задействовать в организации связи как можно меньше роботов, полученный граф необходимо упростить, за счет внедрения в граф дополнительных вершин – перекрестков, которые будут соответствовать вспомогательным роботам-связистам. Для этого используется поочередный просмотр ребер и выявление подграфов, состоящих из трех основных вершин. Для уменьшения ресурсоемкости системы и увеличения скорости выполнения алгоритма можно ввести ограничения, исходя из условий задачи Штейнера [4] и свойств точки Штейнера: из трех вершин всех выбранных подграфов выбирается средняя и если угол при ней больше 120 градусов, то поиск возможных вариантов реорганизации связи не производится, в противном случае используется алгоритм решения задачи Штейнера для трех точек (Рис. 4.).

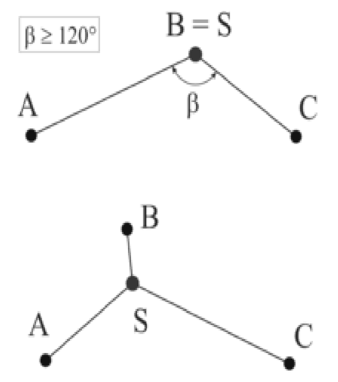


Рис.3. Решение задачи Штейнера для трех точек

Результатом работы описанных выше алгоритмов будет массив ребер и вершин, которые необходимо добавить для получения полносвязанного графа. Ребро хранится в памяти в виде двух вершин, задающих ребро и его длины. Вершины в свою очередь также задаются парой координат. Таким образом, для завершения работы алгоритма необходимо сформировать массив координат расположения роботов. Этот массив формируется из координат вершин, формирующих ребро, которые определяются путем его дробления на отрезки меньшие либо равные радиусу связи и вычисления их координат.

Связанность сети проверяется на каждом такте работы системы, в случае отсутствия связи между некоторыми из ее агентов, а также при недостаточном их количестве в системе могут возникать значительные задержки. Таким образом по результатам работы программы, составленной по предложенному алгоритму, можно получить массив с данными о наличии связи между всеми роботами и переизбытке (наличие полностью свободных агентов) или нехватке вспомогательных агентов, по которому возможно сделать выводы о эффективности выполнения поставленной задачи.

Поддержание связанности в многоагентной системе

Предложенный алгоритм позволяет определить рациональное размещение агентов в конкретный момент времени. Следующим этапом решения задачи обеспечения связанности является определение способов переместить агентов из текущего положения в определенное оптимальное без потери связи. Для этого необходимы алгоритмы перераспределения задач между агентами и алгоритмы поддержания связанности.

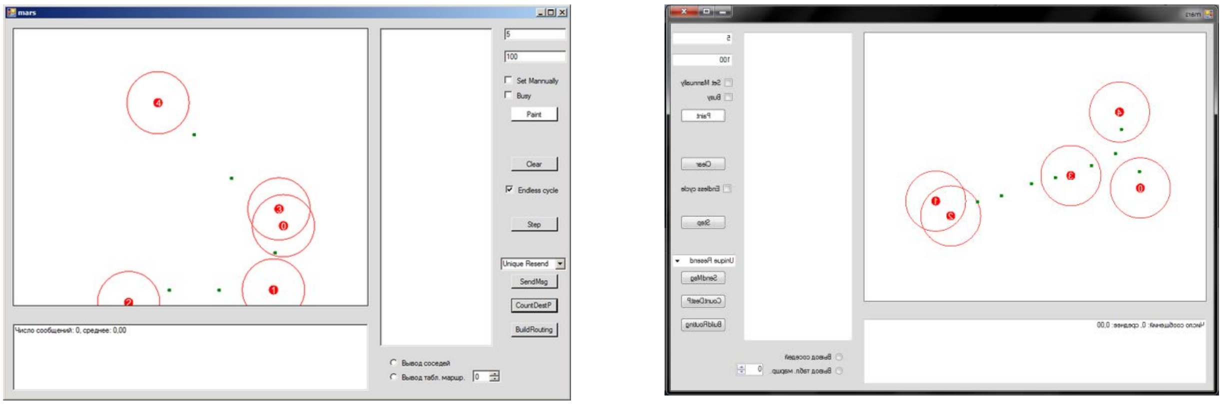


Рис.4. Моделирование поведения МАРС. Красным обозначены роботы, занятые непосредственным выполнением задачи, зеленым – роботы-связисты

Поддержание связанности в многоагентной системе основывается на прогнозировании предстоящей обстановки в рабочей области МАРС и последующем определении возможных действий мультиагентной системы. Анализ возможных применений МАРС показывает возможность возникновения особых ситуаций. К таким ситуациям относятся:

- «разрывы» - ситуация при которой существует связь между двумя роботами, но роботы движутся в противоположном направлении;
- «соединения» - ситуация, при которой отсутствует связь между двумя роботами, но роботы движутся во встречном направлении;
- «перегрузки» - ситуация, при которой из-за большого количества проходящих через узел сообщений возникают задержки;
- «простои» - ситуация, при которой через узел не проходят никакие сообщения, за исключением сообщений этого узла.

Очевидно, что ситуации 1 и 3 требуют использования дополнительных (свободных от задач) агентов, задачи 2 и 4 позволяют высвободить агенты от выполнения текущей задачи. Определение таких ситуаций возможно на основе матриц связанности, описанных в предыдущем параграфе, и данных о планируемых действиях каждого агента. Предлагаемый метод состоит из трех этапов: анализ полученных матриц и данных; проверка выявленных особых ситуаций, принятие решении об изменении последовательности выполнения подзадач.

Заключение

В данной работе проведено исследование задачи организации и поддержания связи в многоагентных системах. Предложены алгоритмы объединения интеллектуальных агентов многоагентной робототехнической системы единой беспроводной сетью. Представлена возможная реализация алгоритма определения связанности роботов и поиска возможных способов объединения агентов в единую сеть. Предложены алгоритмы поддержания связанности и прогнозирования возникновения разрывов.

Результаты заложены в основу программного обеспечения (рис.4), которое позволяет моделировать поведение многоагентной робототехнической системы с заданным количеством роботов, оценить наличие связи в любой момент выполнения поставленной перед МАРС задачи, определить координаты вспомогательных роботов, которые необходимо добавить (или переназначить из имеющихся) для восстановления связанности.

Результаты данного исследования могут быть использованы при оценке эффективности численности группировки агентов в многоагентной робототехнической системе, а также при планировании движений и при распределении задач.

1. Multi-sensor ATTenuation Estimation (MATTE): Signal-strength prediction for teams of robots, Johannes Strom and Edwin Olson, U.S. DoD Grant FA2386-11-1-4024.Department of Computer Science and Engineering, University of Michigan, Ann Arbor, MI 48109 USA
2. Задача Штейнера.-[Электронный ресурс].-Режим доступа: http://ru.wikipedia.org/wiki/Задача_Штейнера, свободный.- Загл. с экрана
3. А. О. Иванов, А. А. Тужилин Теория экстремальных сетей. — Москва–Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2003. — ISBN 5-93972-292-X.
4. А. О. Иванов, А. А. Тужилин Задача Штейнера на плоскости или плоские минимальные сети // Матем. сб.. — 1991. — Т. 182. — № 12. — С. 1813–1844.

5. Алгоритмы о выборе дороги и сетях. Сети Штейнера. Лекция Владимира Протасова в Яндексе.- [Электронный ресурс].-Режим доступа: http://habrahabr.ru/company/yandex/blog/215931/, свободный.- Загл. с экрана
6. Модели и алгоритмы обеспечения связанности агентов мультиагентной робототехнической системы в беспроводной сети, «Успехи современной радиоэлектроники» издательства «Радиотехника», №3, с201-206, 2015

I.V. Vatamaniuk, G.Ju. Panina, A.L. Ronzhin

MODELING OF TRAJECTORIES OF THE ROBOTIC SYSTEMS IN THE SPATIAL RECONFIGURATION OF THE SWARM

SPII RAS, Saint-Petersburg, Russia
vatamaniuk@iias.spb.su, gaiane-panina@rambler.ru, ronzhin@iias.spb.su

Abstract

An algorithm for calculating trajectories of a swarm of robots in the convex surface formation is discussed. The calculation of the robot trajectories in the reconfiguration is considered taking into account the time and energy costs minimization. The simulation results are presented for different number of robots (10 to 10000).

Keywords: a swarm of robots, topological robotics, surface imitation, group control, unmanned vehicles, robotic systems

И.В. Ватаманюк, Г.Ю. Панина, А.Л. Ронжин

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАЕКТОРИЙ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ПРИ РЕКОНФИГУРАЦИИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПОЛОЖЕНИЯ РОЯ

Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН, Санкт-Петербург
vatamaniuk@iias.spb.su, gaiane-panina@rambler.ru, ronzhin@iias.spb.su

Аннотация

В статье предложен алгоритм расчета траекторий перемещения роя роботов при формировании выпуклых поверхностей в пространстве. Расчет траекторий роботов при реконфигурации роя проводится с учетом минимизации временных и энергетических затрат. Представлены результаты моделирования реконфигурации роя роботов для разных значений их количества (от 10 до 10000).

Ключевые слова: рой роботов, топологическая робототехника, имитация поверхностей, групповое управление, беспилотные аппараты, робототехнические комплексы

Введение

В отличие от одиночных роботов системы автономных мобильных роботов способны решать больший класс гражданских и военных задач, включая тушение пожаров, спасательные операции, аграрные и другие задачи [1-4]. Применение многоагентных децентрализованных способов взаимодействия групп роботов позволяет создавать робототехнические системы более гибкие к реконфигурации, устойчивые к противодействующим факторам и низкой себестоимостью [5-8].

В работе [9] рассматривается методология решения задач системой роботов, при этом круг возникающих проблем раскладывается в зависимости от трех основных аспектов: 1) робот выполняет одновременно одну задачу или множество; 2) задача выполняется одним роботом или множеством; 3) задача решается сразу при назначении или существует план задач, требующих выполнения. На основе предложенной таксономии проблем в работе [10] предлагается подход к формированию коалиций роботов для решения задач в режиме реального времени, обеспечивающий предсказание времени выполнения частной задачи каждым роботом.

В работе [11] изучается проблема разделения роя мобильных роботов на сбалансированные подгруппы, предлагаются алгоритмы контроля положения и ориентации групп роботов при выстраивании определенной пространственной структуры. В предлагаемых в работе алгоритмах управление моделями роботов производится с учетом двух основных параметров: синхронизации и ориентации отдельных роботов. Рассматриваются три типа синхронизации роботов: 1) синхронная модель, когда все роботы работают по одному времени и в каждом цикле выполняют какой-либо тип действия; 2) полусинхронная модель, когда все роботы действуют по одним циклам, но не обязательно все активны в каждом цикле; 3) асинхронная модель, когда роботы действуют по своим независимым по длительности циклам.

Вопрос ориентации и согласования локальных систем координат распределенных роботов также рассмотрен в работе [12], где выделяются пять различных моделей координации: 1) полнокомпасная модель, при которой все роботы имеют одинаковую ориентацию и направление всех осей; 2) полукомпасная модель, при которой все роботы имеют одинаковую ориентацию осей, но положительное направление только одной оси одинаково для всех; 3) направленная модель, при которой ориентация осей одинакова для всех роботов, но положительное направление осей может не совпадать; 4)соосная модель, при которой ориентация осей одинакова для всех роботов, но не согласованы их направления и типы осей x и y могут не совпадать; 5) неориентированная модель, при которой координатные оси роботов не согласованы.

Решение задачи планирования пути перемещения группы роботов на основе стратегии ведущий (лидер) – ведомый рассматривается в работе [13]. В предложенном подходе при перемещении робот-лидер придерживается желаемой траектории, а ведомые роботы ориентируются на положение соседних роботов. Основная проблема при решении задачи планирования пути состоит в расчете непрерывных траекторий движения всех роботов от начальных до таргетных точек, избегая коллизий с другими роботами и столкновений с окружающими препятствиями. В работе [14] рассмотрена задача передвижения роботов-футболистов, при которой не допускаются контакты с другими роботами и воротами.

С ростом числа одновременно управляемых или взаимодействующих роботов точное позиционирование каждого робота в общей структуре становится проблематичным. Решение данной проблемы часто рассматривается в подходах, ориентированных на формирование заданных форм группами роботов, которые в процессе движения выстраиваются в необходимые точки пространства [15-17]. Дополнительным препятствием при формировании пространственной формы множеством роботов также может быть сложность самой имитируемой формы. В работе [18] предлагается декомпозировать имитируемую пространственную форму на части и сформировать несколько подмножеств (групп) роботов, отвечающих за формирование своей части формы. После формирования групп проблема управления роботами решается на двух уровнях: 1) взаимодействие роботов внутри группы; 2) взаимодействие между группами роботов. При этом авторы также используют стратегию «ведущий (лидер) – ведомый» и, в зависимости от сложности формируемой фигуры, вводят несколько уровней доминирования для ведомых групп роботов. Движение начинает глобальный лидер-робот вместе со своей группой, за которым следуют лидеры ведомых групп со своими ведомыми роботами. В проведенных экспериментах роботы изначально располагались в случайном порядке при формировании фигуры китайского иероглифа и простейшей схемы самолета. Также проверялась робастность алгоритма по отношению к временной потере лидера одной из ведомых групп.

Анализ существующих работ по формированию пространственных фигур из множества однородных роботов показал, что существует две тенденции к расположению роботов в конечном состоянии: 1) все используемые роботы располагаются на или около поверхности создаваемой пространственной формы; 2) роботы могут находиться как на поверхности, так и внутри генерируемой формы. Второй подход кажется наиболее перспективным, так как в случае выхода из строя отдельных роботов, они могут быть заменены теми, что находятся внутри. Причем внутри фигуры роботы могут располагаться случайным образом или с заданной структурой.

Последний вариант используется в работе [19], где предложен новый топологический метод формирования пространственной фигуры из множества роботов на основе многоуровневой архитектуры, причем построение производится послойно с определенным расположением роботов на каждом уровне внутри всей формы.

Постановка задачи

Имеется некая выпуклая поверхность *S*, которую нужно покрыть роботами с заданной плотностью ρ. Плотность ρ есть желаемое число роботов на квадрате 10×10. Поверхность задается набором вершин $v_i = (x_i, y_i, z_i)$, а также набором треугольных граней, занумерованных от 1 до *M*. Грани задаются индексами (i, j, k). Каждый робот представляет собой шар радиусом *R*. Общее количество роботов *n*. Предполагается, что роботы могут либо двигаться со скоростью V, либо стоять неподвижно. Кроме того, имеется ограничение на минимальное допустимое расстояние между центрами двух роботов – *MinDist*. Предполагается, что количество роботов достаточно для покрытия поверхности с требуемой плотностью.

Требуется получить следующие выходные параметры:

1. конечные координаты центров всех объектов, участвующих в реконфигурации (таргетные точки на поверхности *S*);
2. расчетные траектории движения объектов, задействованных в моделировании фигуры;
3. оценку вычислительных затрат;
4. оценку времени перестроения объектов в требуемую фигуру.

Поскольку в процессе движения роботов к таргетным точкам их траектории могут пересекаться, могут возникнуть ситуации, когда нарушается запрет на минимальное допустимое расстояние *MinDist* (так называемые коллизии). Для избежания коллизий необходимо ввести следующие корректировки. Если роботу на пути к таргетной точке приходится пересекать поверхность, то он делает это в соответствующей ей точке портала. Чтобы избежать коллизий с уже прибывшими на место роботами, роботы должны приближаться к поверхности по вектору нормали (Рис. 1). В случае, если траектории роботов пересекаются в процессе движения, некоторым из них приписывается задержка по времени начала движения. Такие роботы начинают движение в момент времени *T*.

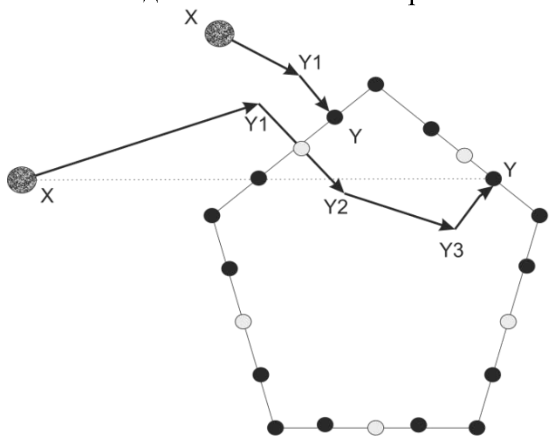


Рис. 1. Примеры траекторий роботов

На Рис. 1 показаны примеры траекторий движения роботов. Черным цветом отмечены таргетные точки, белым - точки портала. В идеальном случае каждый робот движется к своей таргетной точке по прямой, причем все роботы начинают движение одновременно (в момент времени 0). Рассмотрим более детально предлагаемый алгоритм реконфигурации роя роботов.

Алгоритм расчета траекторий движения роботов при реконфигурации роя

Разработанный алгоритм состоит из следующих основных этапов: (1) анализ и оснащение формируемой поверхности и расчет координат таргетных точек; (2) задание соответствия между роботами и таргетными точками; (3) расчет траекторий движения роботов с учетом возможных коллизий и времени начальных задержек каждого робота.

На первом этапе алгоритма выполняется расчет координат таргетных точек и точек портала. Таргетные точки условно делятся на три типа: вершины поверхности, точки, лежащие на ребрах, точки, лежащие на гранях поверхности. Таргетные точки первого типа заданы непосредственно координатами вершин поверхности *S*. Координаты таргетных точек второго и третьего типа вычисляются на основе желаемого расстояния δ между таргетными точками на поверхности с условием максимально равномерного распределения по поверхности. Кроме того, на таргетные точки и точки портала распространяется ограничение *MinDist*. После того как точки портала и таргетные точки определены, для каждой из них задаются по две нормальные точки. Каждая нормальная точка отстоит от исходной в направлении нормали на расстояние *MinDist*.

Следующим этапом алгоритма является присвоение каждому роботу своей таргетной точки. Таргетные точки нумеруются числами от 1 до *N*. Каждой таргетной точке по порядку номеров присваивается ближайший робот из еще не задействованных. Таким образом составляется упорядоченный список действующих роботов, остальные роботы считаются пассивными и не участвуют в реконфигурации.

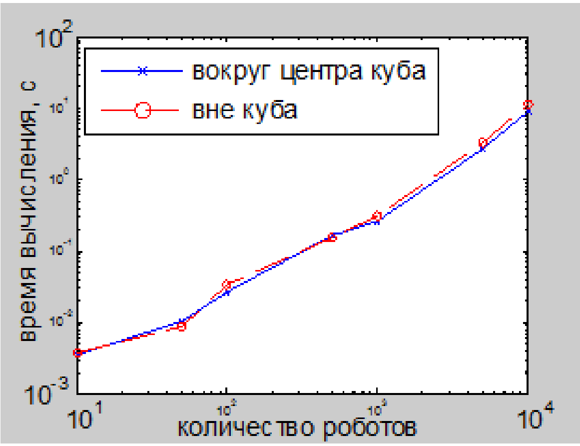
Расчет траекторий движения роботов

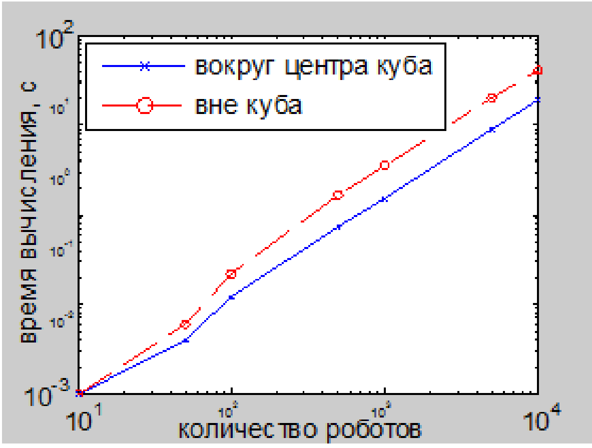
Зададим траектории каждого робота следующим образом. В случае если траектория робота *k* не пересекает поверхность *S*, этот робот в момент времени $T(k)$ начинает двигаться к нормальной точке своей таргетной точки, затем к самой таргетной точке, в которой и останавливается. В случае, если траектория робота *k* пересекает поверхность *S*, он в момент времени $T(k)$ начинает двигаться к нормальной точке портала, пересекает поверхность по нормали через точку портала, затем движется к нормальной точке своей таргетной точки. Добравшись до нее, он (без задержки) двигается к своей таргетной точке, в которой и останавливается.

Момент времени $T(k)$ начала движения каждого робота изначально равен нулю. Тест на коллизии выполняется для двух роботов: робота с номером k и каждого из роботов с номерами меньше k. Для каждого прямолинейного участка траекторий обоих роботов рассчитываются соответствующие временные интервалы. Каждый из роботов движется от момента времени t_0 до момента времени t_1 с постоянной скоростью V либо покоится. На каждом из интервалов выполняется поиск минимума квадратной функции от времени (расстояния между роботами). В случае коллизии роботу со старшим номером присваивается задержка по времени, и тест на коллизии для этого робота проводится заново.

Результаты компьютерного моделирования

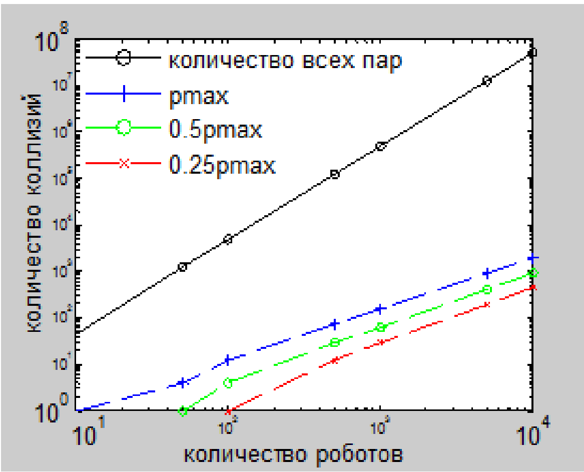
При моделировании предложенного алгоритма использовалась кубическая поверхность, размер которой был рассчитан исходя из плотности размещения роботов на поверхности. Эксперименты проводились для следующих значений числа роботов: 10, 50, 100, 500, 1000, 5000, 10000. Были рассмотрены три варианта размещения роботов: при максимальной плотности размещения ρ_{max}, при плотности $0{,}5\rho_{max}$, при плотности $0{,}25\rho_{max}$. Начальное расположение роботов определялось набором случайных координат. Были рассмотрены два варианта начального расположения роботов: вокруг центра куба на расстоянии не большем, чем 10 длин ребра куба и вне поверхности на расстоянии, не меньшем 10 длин ребра куба. Были оценены: время расчета траекторий (рис. 2(а)), количество коллизий (рис. 2(б)), а также количество пересечений траекторий роботов (рис. 3). Основная цель проведенных экспериментов состояла в оценке числа коллизий, возникающих в том случае, когда роботы начинают движение одновременно и движутся к своим таргетным точкам прямолинейно.

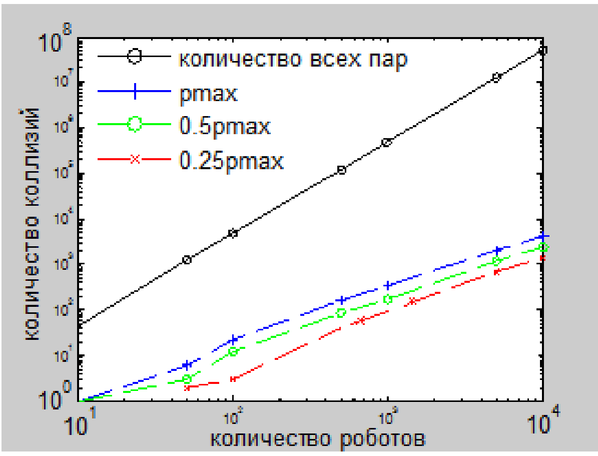




(а) (б)

Рис. 2. (а) Оценка времени вычисления траекторий; (б) оценка количества коллизий при ρ_{max}





(а) (б)

Рис. 3. Оценка количества коллизий при расположении роботов: (а) вокруг центра куба; (б) вне куба

Как видно из Рис. 2(б), число коллизий при указанных условиях не превышает 2,22% от всех возможных пар роботов. На Рис. 2(а) представлены средние значения времени вычисления траекторий.

Заметим, что время расчета траекторий растут пропорционально количеству роботов. Время вычисления траекторий практически не зависит от начального расположения роботов. Из Рис. 4 видно, что с уменьшением плотности расположения роботов количество коллизий уменьшается пропорционально, вне зависимости от способа начального расположения роботов.

Заключение

В статье предложен алгоритм реконфигурации пространственного положения роя роботов. Время реконфигурации существенно зависит от взаимного расположения роботов и формируемой ими поверхности, однако оно близко к минимальному, поскольку роботы движутся к ближайшим таргетным точкам по траекториям, близким к прямолинейным. Направление движения каждого из роботов меняется не более трех раз, причем незначительно, что экономит затраты на пространственную переориентацию робота.

Разработанная программная модель позволяет наглядно продемонстрировать движение большого числа малых робототехнических комплексов при формировании пространственных фигур. Экспериментальное моделирование движения роя проводилось при разном количестве роботов (от 10 до 10000 единиц) с целью проверки масштабируемости математического обеспечения и объема потребляемых вычислительных ресурсов.

1. Sousselier T., Dreo J., Sevaux M. Line formation algorithm in a swarm of reactive robots constrained by underwater environment // Expert Systems with Applications (2015), http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2015.02.040
2. Hu J., Xu J., Xie L. Cooperative search and exploration in robotic networks // Unmanned Systems, Vol. 01(01), 2013, pp. 121–142.
3. Gazi V. Swarms aggregation using artificial potentials and sliding mode control // IEEE Transactions on Robotics, Vol. 21(4), 2005, pp. 1208–1214.
4. Shuang, L., Dong, S., & Changan, Z. (2011). Coordinated motion planning for multiple mobile robots along designed paths with formation requirement // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 16, pp. 1021–1031.
5. Chen Y.Q., Wang Z., Formation control: a review and a new consideration // In:Proc. IEEE Int. Conf. Intell. Robots Syst., 2005, pp. 3181–3186.
6. Hsieh M.A., Kumar V., Chaimowicz L. Decentralized controllers for shape generation with robotic swarms // Robotica, Vol. 26(5), 2008, pp. 691–701.
7. Lawton J. R., Beard R.W., Young B.J. A decentralized approach to formation maneuvers // IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 19(6), 2003, pp. 933–941.
8. Ren W., Sorensen N. Distributed coordination architecture for multirobot formation control // Journal of Robotics and Autonomous Systems, Vol. 56(4), 2008, pp. 324–333.
9. Gerkey B., Mataric M. A formal analysis and taxonomy of task allocation in multi-robot systems // International Journal of Robotics Research, Vol. 23 (9), 2004, pp. 939–954.
10. Guerrero J., Gabriel Oliver Multi-robot coalition formation in real-time scenarios // Robotics and Autonomous Systems, Vol. 60, 2012, pp. 1295–1307.
11. Efrima A., Peleg D. Distributed algorithms for partitioning a swarm of autonomous mobile robots // Theoretical Computer Science Vol. 410, 2009, pp. 1355–1368.
12. G. Prencipe, Corda: Distributed coordination of a set of atonomous mobile robots, in: Proc. 4th European Research Seminar on Advances in Distributed Systems, May 2001, pp. 185–190.
13. Asl A., Menhaj M., Sajedin A. Control of leader–follower formation and path planning of mobilerobots using Asexual Reproduction Optimization (ARO) // Applied Soft Computing. Vol. 14, 2014, pp. 563–576.
14. Zhang Q., Chen D., Chen T. An obstacle avoidance method of soccer robot based on evolutionary artificial potential field, Int. Conf. FEMR 16, 2012, pp. 1792–1798.
15. Cheah C.C., Hou S.P., Slotine J.J. Region-based shape control for a swarm of robots // Automatica, Vol. 45(10), 2009, pp. 2406–2411.
16. Derenick J.C., Spletzer J.R. Convex optimization strategies for coordinating large-scale robot formations // IEEE Transactions on Robotics, 23(6), 2007, pp.1252–1259.
17. Sabattini L., Secchi C., Fantuzzi C. Potential based control strategy for arbitrary shape formations of mobile robots. In Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2009, pp. 3762–3767.
18. Haghighi R., Cheah C. Multi-group coordination control for robot swarms // Automatica Vol. 48, 2012, pp. 2526–2534.

19. Yan X., Chen J., Sun1 D. Multilevel-based topology design and shape control of robot swarm // Automatica. Vol. 48, 2012, pp. 3122–3127.

A.S. Yuschenko

TO THE COOPERATION MODE OF ROBOT CONTROL

Bauman MSTU, Moscow, Russia
robot@bmstu.ru

Introduction

The modern mobile manipulation robot is an “intelligent” technical system capable to work autonomously. Nevertheless the operator needs to control the robot in some cases. For the first time it is hazardous operations with dangerous objects and rescue operations. Another tasks of extremal robotics are the medical operations using a robot. A new area of application for robots controlled by unqualified operator is a service robotics including the rehabilitation of disabled.

To control a robot by an unqualified operator it is necessary to simplify the mode of human-robot cooperation as far as possible. The most convenient mode for human is a bilateral speech dialogue [1]. The task of control now is transformed into the task of cooperation as the robot now is not more a controllable object but the technical subject capable to determine its own tasks and a line of behavior suitable to the task prescribed by human operator. The speech control is not a unique mode of human-robot interaction. In absence of speech interaction the control may be fulfilled using gesture. For the precision operations the tactile and force-torque feedback is necessary. For example the tactile sensation is necessary for rehabilitation of blind and to fulfill the operations by surgeon using a robot. The force-torque feedback is necessary for such technological operations as assembly and complicated surfaces machining. So we can now have a multimodal human-robot interface [2].

For the last time a new direction in robotics arose which may be named an anthropomorphic robotics [3]. Imitation of facial expression of robot-partner makes it possible for the human-partner to feel the emotional aspect of situation. The robot also “can understand” the facial expression of his master.

The dialogue human-robot (ergatic) systems differs radically from a traditional control system. From the system-oriented point of view the human-robot interface now is bilateral one and active interaction of the both partners is supposed. It may have a form of speech dialogue containing the mutual analysis of the situation. It may include a sensory level during the operation of mechanical and of cognitive type. The active interface may also include analysis of the functional state of the operator the peculiarity of his speech, gesticulation, facial expression and imitation of the corresponding states by robot. It is a system of two or more partners to solve together a common task. Such system may be named a system of cooperative mode of control [4].

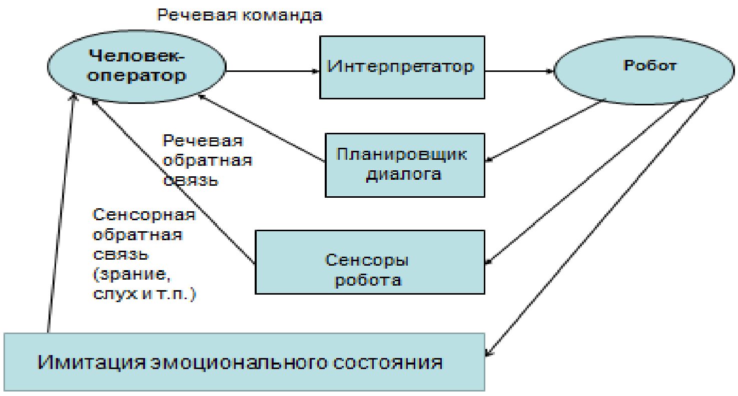


Fig.1 The functional diagram of the cooperation control system

The cooperative control systems enlarge the class of dialogue systems because now we have the new feedbacks as on the sensory level as on the level of emotions (Fig.1). But the main idea of cooperation mode of control is deeply. The task is to organize on the anthropomorphic principles all the cognitive behavior of robot including its “perception” and logical resolution which is necessary to effective human-robot interaction.

The main tasks of cooperative control are the next: the joint analysis of situation, the joint operation planning, and the multimodal human-robot interface support. From these tasks become clear the necessity of profound psychological analysis of the new kind of human activity such as cooperative control of an “intelligent” robot. As for mathematical background for these tasks – the linguistic variables, fuzzy logic and fuzzy resolution seems the suitable means. We suppose that such mathematical technology make it possible to join the technical tasks of robot control with psychology peculiarities of perception and resolution inference by human.

Situation analysis

An example of human-robot interaction on the level of the task planning is the medical robotic system for intravascular diagnostics [5]. During the robot movement through the vessel the robotic system using computer vision supports the work of surgeon. It can to determine the type of the obstacle in the inner surface of the vessel and to work out the recommendation for surgeon. In undetermined situations control may be passed to surgeon. The human-robot dialogue may be organized using a profession-oriented language accepted in medical practice. The logical inference on the situation level may be fulfilled on the base of the fuzzy situation control [6]. The correspond expert system accumulate the experience of human surgeon in the operation of the same type.

Another example of the cognitive human-robot interaction is the task of the fire reconnaissance using a mobile robot. The robot equipped with the technical diagnostic system capable to determine the type of the fire [7]. The robotic system can autonomously plan it own movement so to come close to the source of fire and the operator distantly control it work using a professional-oriented language. As in the example above the human have opportunity to turn into direct robot control if it necessary.

Interaction in the tasks of control and planning

Application of the natural relations of time and space ensure to make the robot control an easier task. The results of the situation analysis may be presented in terms usual for the perception of human himself, which make the dialogue control much easier [8]. The problem of agreement of psycho-physiological scales of perception is under discussion for a long time [9]. The application of the known results allows organize the bilateral human-robot dialogue using the natural for human relations of time and space.

In the case of the robot activity planning the logical inference may be organized using a principle of successive contradictions solving which is usual also in human practice. It allow the human easy controls the planning procedure and include if necessary [10].

For the speech human-robot dialogue the effective means seems the models using Petri nets technology. The structure of the dialogue system control is depicted on fig.2. The system includes a dialogue manager. During the work the speech dialogue between human fnd robot arises and the dialogue manager addresses to planning module and asks the forecasts of the next situation and the resolutions up to the achievement of the task [11].

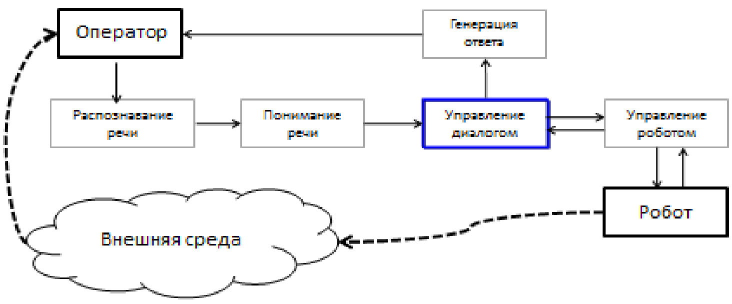


Fig.2. The diagram of the speech control system

The emotional level of control

In the case of service robots the dialogue management may be make easier using an emotional aspect. Here two elements must be separated. The first is the emotional evaluation of the situation by the subject (human or robot). The second is the relation of the subject to the situation and emotional representation of the relation. The latter supposed the presence of the second partner capable to understand this relation without any explanations.

Using an analogy with mechanics we have “a direct task of emotion” which is to demonstrate an emotion on the artificial “face” of robot (or a screen reproduction). And “the reverse task” is to recognize an emotional state of a subject by the expression of his face by the computer analysis of the state of the face [6].

The fuzzy logic technology allows to present the basic emotional states of P.Eckman as the linguistic variables. In this case the reverse task i.e. the evaluation of the human emotional state may be presented as a fuzzy-logic inference system capable to learn [12]. Iy is necessary to underline that the "emotional interaction" between human and robot is bilateral as the modes of interaction presented above. It allows the human to evaluate for example the dangerous of the situation jn the emotional level immediately. From the other side the robotic system also can recognize the emotional reaction of human to take in consideration to plan the future behavior.

Conclusion

All the aspects of the cooperative control need a profound psychological analysis of the new kind of human activity. Among the problems are the adequateness of the mental representation of the real situation using the representation formed by robot in linguistic variables. The question of a complex perception of the situation by human-operator using multimodal information from robotic systems seems one of most complicated. It is also necessary to investigate the procedure of common planning the operations of the robotic system including the operation of cognitive type. Practically unknown the problem of emotional level of perception of real situation by human in the process of cooperative robot control.

So the evolution of human -robot systems now is oriented to anthropomorphism spreading firstly to organization of cognitive activity of "intelligence" robotic systems.

1. Yuschenko A.S. Dialogue robot control on the base of fuzzy logic. Proc. of International Conference ER-2012, Sept.,2012, "Politechnika-service", S-Pb, 2012, p.p.29-36
2. Ronzhin A.L.,Yusupov R.M. Multimodal interfaces of autonomous mobile robotic systems. Izvestia YUFU, Technical sciences № 1, 2015, p.p. 195-207
3. Konyshev D.V., Vorotnikov S.A., Vibornov N.A. Facial expression control systems of service robots using the emotion synthes technology. Prikaspiisky Zhournal. Upravlenie I vysokie technologii, 2014, №3 (27), p.p. 216-229
4. Kristensen S., Horstmann S., Klandt J., Lohnert F., Stopp A. Human-robot friendly interaction for learning and cooperation. Proc. of the IEEE Intern, Conf. on Robotics and Automation- 2001, Seoul. Korea, p.p. 2590 – 2595.
5. Yuschenko A.S., Voynov V.V. Medical microrobot control using fuzzy finite automata. – Robotics and technical cybernetics, №3(4), 2914, c. 22-25
6. Melichov A.N., Bernshtein L.S., Korovin S.Ya. Situation advising system with fuzzy logic. – Nauka, FM,M. – 1990
7. Tachkov A.A., Yuschenko A.S. Integrated control system of a fire robot – Vestnik BMSTU. Special issue, 2015.№3, p.p. 196-119
8. Volodin Yu.S, Michailov B.B.,Yuschenko A.S. The fuzzy classification of obstacles by mobile robot using computer vision. Proc. of the Intern. Conf. "Integrated Models and Soft Calculations in Artificial Intelligence" 2011, Kolomna , p. 372 – 380
9. Averkin A.N., Tarasov V.B. A fuzzy relation in simulation with application to psychology and artificial intelligence. – Reports on applied mathematics – Academy of sciences of USSR, M., 1986
10. Yuschenko A.S. Intelligence planning of the robot activity. – Mechatronics, automatics and control, 2005, № 3, p.p. 5-18
11. Zhonin A.A. The algorithm of teaching of dialogue manager for dialogue control system of robot. Proc. of the Intern. Conf. "Integrated Models and Soft Calculations in Artificial Intelligence" 2011, Kolomna , p. 395-406
12. Yuschenko A.S., Konishev D.V. Simulation of emotion in robotics using fuzzy logic technology. Proc. of the Intern. Conf. "Integrated Models and Soft Calculations in Artificial Intelligence" 2015, Kolomna , p. 515-525

А.С. Ющенко

К ЗАДАЧЕ КООПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ РОБОТАМИ

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва
robot@bmstu.ru

Введение, постановка задачи

Современные манипуляционный мобильный робот представляет собой «интеллектуальную» техническую систему, способную к автономному поведению. Тем не менее, во многих случаях функционирование робота предполагает участие человека-оператора. В первую очередь, это задачи экстремальной робототехники, выполнение которых связано с риском для человека. В том числе, работы, связанные с обезвреживанием опасных объектов, спасательные операции. К задачам экстремальной робототехники можно отнести и выполнение медицинских операций с помощью роботов. Относительно новым направлениемявляется сервисная робототехника, включающая различные по своему содержанию задачи реабилитации инвалидов. Во всех перечисленных случаях предполагается совместное участие человека, не обладающего специальными знаниями, в работе робототехнической системы.

Применение робототехники операторами, не имеющими специальной подготовки, требует максимального упрощения способов взаимодействия человека и робота. Наиболее естественным способом такого взаимодействия является речевое диалоговое управление [1]. Постановка задачи об управлении в этом случае видоизменяется, поскольку робот становится уже не объектом управления, а техническим субъектом-партнером, способным самостоятельно определять свои подцели и линию поведения в интересах общей задачи, поставленной оператором. Однако взаимодействие человека и робота не огранено речевым диалогом. При отсутствии речевого взаимодействия указания оператора в ряде случаев могут быть переданы с помощью жестов. При выполнении наиболее тонких операций с помощью робота могут потребоваться сенсомоторные и тактильные обратные связи. Например, тактильные ощущения, необходимы при реабилитации инвалидов по зрению, при выполнении дистанционных хирургических операций. Ощущение вектора сил и моментов необходимо при дистанционном управлении операциями сборки или обработки поверхностей сложной формы. Таким образом, можно говорить о многомодальном интерфейсе «человек-робот» [2]. В последнее время применительно к сервисным роботам энергично развивается направление, которое условно можно назвать антропоморфной робототехникой [3]. Имитация тем или иным способом мимики робота-собеседникапозволяет партнеру-человеку непосредственно воспринять эмоциональную окраску ситуации. При этом и робот способен распознать мимику своего «хозяина».

Рассматриваемый класс эргатических (человеко-машинных) робототехнических систем имеет принципиальные отличия от традиционных систем управления. Функциональное отличие состоит в том, что многомодальный интерфейс теперь является двусторонним, т.е. он предполагает активное взаимодействие обоих «партнеров» - человека и робота. Такое взаимодействие может происходить на уровне речевого диалога, сопровождающегося анализом текущей ситуации обоими «партнерами». Оно может происходить на сенсомоторном уровне при выполнении когнитивных и рабочих операций. Взаимодействие может включать в себя как анализ функционального состояния, его речи, жестикуляции, мимики, так и воспроизведение аналогичных «состояний» роботом. Теперь это система многомодальноговзаимодействия двух, или большего числа партнеров, решающих совместно некоторую общую задачу. Такого рода системы можно назвать системами кооперативного управления [4].

Класс систем кооперативного управления расширяет класс систем диалогового управления, предполагающий взаимодействие человека и робота на уровне речевого диалога. С функциональной точки зрения в такой системе возникают обратные связи как на уровне зрительной и сенсомоторной обратной связи, так и на уровне эмоций (Рис.1).

Однако, существо кооперативного управления заключается в другом. Речь идет об «антропоморфном» восприятии роботом ситуации, об антропоморфном логическом выводе и принятии решений, что необходимо для обеспечения продуктивного взаимодействия человека с технической системой. При этом «эргономическая» часть управления переходит на другой уровень – от непосредственного управления роботом к целеуказанию, постановке задач и оценке результатов автономной «деятельности» робота.

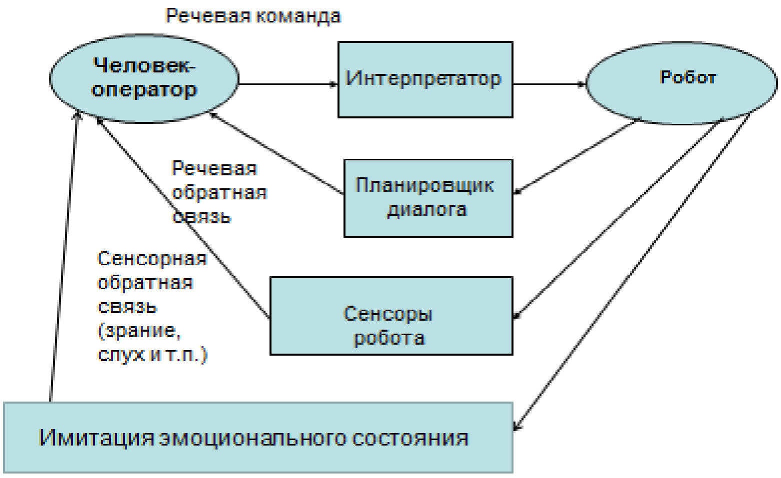


Рис.1. Функциональная схема системы кооперативного управления

К основным задачам кооперативного управления можно отнести задачи совместного анализа рабочей сцены и текущей ситуации, совместного планирования операций, организации интеллектуального многомодального интерфейса. Уже из этого перечня следует необходимость рассмотрения психологических аспектов такого относительно нового вида деятельности человека как кооперативное управление автономным роботом. Математическим аппаратом для решения этих задач может служить аппарат лингвистических переменных, нечеткая логика, включая автоматизированный нечеткий вывод в нейро-нечетких системах. Именно этот математический аппарат, на наш взгляд, даёт возможность связать технические задачи управления роботами с психологическими особенностями восприятия, выработки решения и управления в реальном масштабе времени со стороны человека – оператора.

Задачи анализа ситуации

Характерными примерами взаимодействия на уровне постановки задач является работа медицинского робота, предназначенного для выполнения задач внутрисосудистой диагностики с помощью микроробота [5]. Речь идёт о микророботе, вводимом в крупные артерии человека для анализа внутреннего состояния сосудов. В проблемных ситуациях, когда перед микророботом появляются препятствия в виде кальцинированных отложений на стенках сосуда, изменений геометрии сосудистого канала (бифуркации), робототехническая система обеспечивает поддержку решений хирурга. Видеоизображение, получаемое с помощью микро-видеокамеры, установленной в головной части робота, автоматически анализируется, распознается тип препятствия, и формируется рекомендуемое управляющее решение, которое предоставляется хирургу – оператору. В критических ситуациях управление роботом передается непосредственно хирургу – оператору. При этом обмен информацией между робототехнической системой и человеком проходит на проблемно-ориентированном языке, соответствующим принятой медицинской практике. В основе принятия решений на ситуационном уровне лежат принципы нечеткого ситуационного управления [6]. Само собой, соответствующая экспертная система, создаваемая заранее, аккумулирует опыт проведения операций такого рода человеком.

Другим примером может служить проведение разведки пожара с помощью робота, использующего диагностическую систему, установленную на борту робота и способную при анализе ситуации в зоне пожара определить его класс [7]. Особенностью этой системы является её способность самостоятельно планировать операции когнитивного типа, в результате которых робот по косвенным измерениям самостоятельно приближается к источнику возгорания. Диалог с оператором, находящимся вне зоны пожара, выполняется на профессионально-ориентированном языке, позволяющем человеку не только контролировать действия робота, но и переходить к непосредственному управлению путем постановки частных задач.

Взаимодействие в задачах управления и планирования

Использование естественных пространственно-временных отношений позволяет существенно упростить задачу управления мобильным роботом. В этом случае анализ пространственной сцены выполняется в терминах, свойственных восприятию пространства самим человеком, что облегчает задачу диалогового управления [8]. Заметим, что проблема согласования психофизических шкал восприятия пространства человеком с представлением этого пространства с помощью лингвистических переменных рассматривалась уже давно [9]. Применительно к управлению мобильными роботами её решение позволяет организовать двусторонний диалог между человеком и роботом с использованием естественных для восприятия человеком отношений пространства и времени. Применение такого подхода потребовало некоторого расширения пространства лингвистических переменных, в том числе, введения понятия перспективы, свойственной восприятию пространства человеком.

В задаче планирования действий робота схема рассуждений при построении плана может быть реализована по принципу последовательного разрешения противоречий между текущей и желаемой ситуацией. Этот способ также соответствует одному из способов поиска решений человеком, что позволяет ему успешно контролировать процедуру планирования и легко включаться в неё по мере необходимости [10].

Применительно к задаче организации речевого диалога человека и робота весьма эффективным средством оказалось применение моделей, основанных на использовании сетей Петри. Структура системы диалогового управления при этом может быть представленав виде схемы на Рис. 2. Система включает так называемый менеджер диалога. В процессе работы возникает речевой диалог между пользователем и роботом, в процессе которого этот блок обращается к модулю планирования и запрашивает предсказания дальнейшего состояния модели мира и решения по дальнейшим действиям вплоть для достижения цели [11].

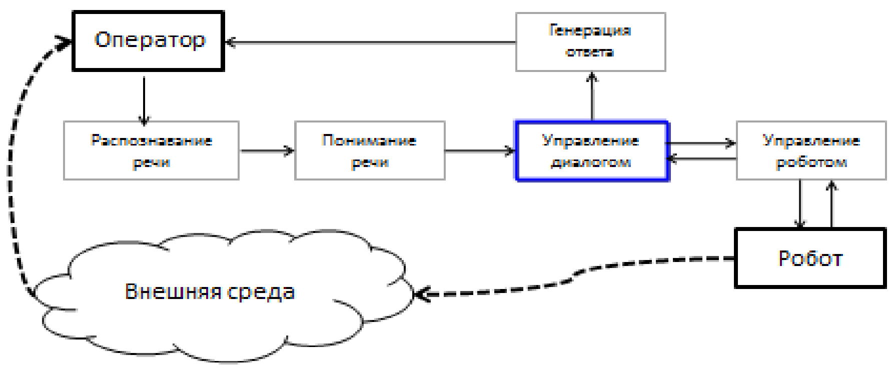


Рис. 2. Схема системы диалогового управления

Эмоциональный уровень взаимодействия

При использовании сервисных роботов организация диалога существенно упрощается при включении в организацию диалога эмоциональной составляющей. В этой области можно выделить две основные составляющие: эмоциональная оценка ситуации субъектом и коммуникативная составляющая - выражение эмоций. Первая составляющая определяет реакцию субъекта (которым может быть как человек, так и робот), на сложившуюся ситуацию, а вторая – определяет его обобщенное отношение к ситуации и предполагает наличие партнера, который может распознать это состояние без каких-либо словесных объяснений.

Применительно к взаимодействию человека и робота можно предложить по аналогии с механикой рассмотреть прямую и обратную задачи «динамики эмоций». Прямая задача состоит в том, чтобы с помощью системы актуаторов воспроизвести выражение человеческого лица на искусственном лице антропоморфного робота (или на экране монитора). Обратная задача «динамики эмоций» может быть определена как оценка эмоционального состояния реального человека (или «эмоционального состояния» антропоморфного робота) по выражению его лица в результате обработки изображения этого лица на компьютере [3]. Применение лингвистических переменных позволяет «развернуть» декартово пространство эмоций П. Экмана, представив базовые эмоциональные состояния в форме лингвистических переменных. При этом «обратная задача», т.е. собственно оценка эмоционального состояния человека может быть представлена в виде решающей нейро-нечеткой системы, способной к предварительному обучению [12]. Подчеркнем, что «эмоциональное взаимодействие» человека и технической системы также как и рассмотренные выше уровни взаимодействия, носит двусторонний характер. При этом человек получает возможность на эмоциональном уровне, мгновенно оценить, например, опасность ситуации. С другой стороны, робот анализирует характер эмоциональной реакции человека на текущую ситуацию и принимает необходимые решения, обеспечивающие достижение поставленной цели.

Заключение

Все рассмотренные аспекты кооперативного управления предполагают психологический анализ этогоспособа человеческой деятельности. К психологическим проблемам можно отнести вопросы адекватности представления человеком ситуации по описанию её роботом-партнером с использованием лингвистических переменных. Остаётся недостаточно исследованным и вопрос о совместном планировании действий человека и робота, включая планирование операций гностического типа. Практически не исследован вопрос об эмоциональном уровне восприятия ситуации человеком по показаниям робототехнической системы. Представляется особенно сложным является вопрос формализации комплексного восприятия ситуации человеком. Решение этой проблемы позволило бы имитировать комплексное восприятие роботом «образа» ситуации.. Таким образом, процесс развития робототехники, ориентированной на взаимодействие робота с человеком, идет по пути антропоморфизма, распространяющегося не только (и не столько) на внешний вид робота, сколько на организацию его когнитивной деятельности. В свою очередь, такая постановка задачи требует серьёзного психологического анализа нового вида деятельности человека – управления «интеллектуальным» роботом.

1. Ющенко А.С. Диалоговое управление роботами на основе нечеткой логики Труды международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника», 25-26 сентября 2012, – Изд. «Политехника-сервис», Санкт-Петербург, 2012, с. 29-36
2. Ронжин А.Л., Юсупов Р.М. Многомодальные интерфейсы автономных мобильных робототехнических комплексов. Известия ЮФУ. Технические науки.№1, 2015, с.195-207
3. Конышев Д. В., Воротников С. А., Выборнов Н.А. Управление мимическим аппаратом сервисных роботов при синтезе эмоций. Прикаспийскийжурнал. Управлениеивысокиетехнологии. 2014. №3 (27), С. 216-229
4. Kristensen S., Horstmann S., Klandt J., Lohnert F., Stopp A. Human-friendly interaction for learning and cooperation. In Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation, p.p. 2590–2595, Seoul, Korea, 2001
5. Ющенко А.С.,ВойновВ.В. «Управление медицинским микророботом с использованием нечетких конечных автоматов» Робототехника и техническая кибернетика», СПб., ЦНИИРТК № 3(4), 2014, с.22-25
6. Мелихов А.Н., Бернштейн Л.С., Коровин С.Я. Ситуационные советующие системы с нечеткой логикой.- Наука, ФМ, М. – 1990.
7. Тачков А.А., Ющенко А.С. Интегрированная система управления пожарным роботом// Вестник МГТУ им. Н.Э.Баумана, Приборостроение, Спецвыпуск №6, 2012,с 106-119.
8. 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.- М.: Физ.мат.лит. 2011. Т.1. с.372-380
9. Аверкин А.Н., Тарасов В.Б. Нечеткое отношение моделирования и его применение в психологии и искусственном интеллекте.// Сообщения по прикладной математике ВЦ АН, СССР.-М.,1986
10. Ющенко А.С. Интеллектуальное планирование в деятельности роботов.// Мехатроника, автоматизация, управление. 2005. №3. с.5-18.
11. 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
12. Ющенко А.С., Конышев Д.В. Моделирование эмоций в робототехнике с использованием нечеткой логики.// Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте. Сб. научных трудов международной конференции. М.: Физ. мат. лит, 2015, с.515-525.

P.P. Byelonozhko

FEATURES OF FUNCTIONING MODES OF PROMISING ASSEMBLY AND SERVICE SELF-CONTAINED ROBOTIC SPACE MODULES

Bauman MSTU, Moscow, Russia
byelonozhko@mail.ru

Introduction

Perspective views of space robotics are related both with the development of perfected prototypes in the line of functional potentialities enlargement and creation of new classes of systems without exploitable analogue this day. At the same time the originality of space robotics objects, extreme functioning conditions, difficulty of full-scale land-based adjustment determine diversity of constructional decisions and wide spectrum of research problems [1-15].

As a whole the development and utilization of robot facilities may be thought of as most relevant to provide for the following tendencies of space-system engineering evolution:

– tendency to functionality enlargement;
– tendency to increase of active operation period;
– tendency to increase of autonomy value;
– tendency to increase of dimensions with the preservation of construction stiffness and strength, its carrying capacity.

It is also significant that at the cost of a use of prospective space robotics facilities possible are just as an automation of operations possible to be carry out by other means, including immediate human being participation, so a mastering of qualitatively new operations which are can’t be basically executed without robot support. At the same time large-dimensioned multitask expandable space systems may be marked out as a class of perspective space objects, which feasibility may depend in a number of cases of a possibility of space robots facilities use [16-25].

We want to emphasize the most important elements of construction aspect and features of making and operation of multitask expandable space systems, including systems without analogue and prototypes:

– substantial mass and size of construction;
– modular building approach; reconfigurability;
– module functionality limitation;
– use both leak-tight and untight modules;
– forming of a finalized system shape for a some time and according to predeveloped strategy;
– wide use of transformable elements;
– working capacity maintenance and functionality change (enhancement) at the cost of regular support manning specifically through substitution of standard modules.

Orbital stations serve as evident examples of systems of the class under consideration. If treating stations as prototypes of future space systems, it would appear reasonable that robot facilities, used for its creation and operation, would be prototypes of promising space robot systems. At the same time notice the important role of project succession and urgency of universal technologies, first of all - docking technology [22–24].

Concept of assembly and service self-contained robotic space modules

Modular building approach was formed early in the development of rocket and space technology and is a natural consequence of feasibility and in some instances of necessity to separate product compositions which are dissimilar in respect to construction, technology and functionality. Notice that a concept on-orbit assembly including automated assembly with use of robotics facilities was also born at the beginning of practical cosmonautics [22–25]. In that way we may consider a conception of docking in outer space as a natural logical corollary of a modular space objects building approach, and a docking technology in its own rights – as a basis of development of advanced robotized technology of on-orbit assembly.

On direct docking by means of docking device means of control system of forward movement and orientation of abutting objects at the instant of contact should offer required docking starting conditions (relative position and relative line and angular velocities). Subsequent to contact a docking device provides step by step shock-absorption, initial miss compensation, coupling (formation of first docking), leveling, retraction, combination of junction with final leveling, rigid connection. At the same time the requirements that can be placed upon the junction are in accuracy, stiffness, strength, containment [22].

Unlike direct docking when docking with the help of manipulator mounted on one of objects a capture of the latter object which is an analogue of coupling by means of docking device may be realized at mutual immobility of abutting objects [22-24].

Following characteristics can be related by advantages of this docking method:

– diminution of impingement attack on abutting objects;
– reduction in requirements on control of movement and orientation of capturing object, where its immobility except «autonomous deadlock» mode can be provided particularly with attaching on some base platform;
– diminution of risk of abutting objects damage in case of miss;
– absence of restrictions imposed by finite time of mutual approach.

Thus the idea of assembly and service self-contained robotic space modules realizing a capture of yet-to-be-assembled construction fragments, carrying them to assembling site and mounting them in normal position using manipulator appears as quite logical.

A great deal of publications are devoted to problems of development, making and usage of such modules [26-33].

As mentioned in [30-31] devices named «free-flying space manipulation robots» [31-33] or «free-flying space robot modules» [27-29] relate to new class of space-system engineering small size objects meant for carrying-out of different tasks in outer space including assembling of big space structures of all types and also for maintenance service of off-station facilities of inhabited space stations and other objects operative in orbit. As noted in [31] main ideas and principles of free-flying space manipulation robots design were formulated, evolved and partially realized relatively long ago. At the same time we will point out multifunctionality and multimode quality of such robot modules, lack of successfully functioning prototypes for today and as a consequence a large quantity of insufficiently studied problems.

We want to emphasize the most general construction elements of assembly and service autonomous robotic modules:

– availability of movable foundation possessing sufficiently high autonomy of space module able to move independently in outer space and meant for contact interaction with other space objects, for example base stations or mountable (attended) objects;
– availability of one or several foundation mounted manipulators providing capability of controlled movement of generally massive trapped load relative to the foundation.

Thus class of technical objects under consideration can be generally idealized using mechanical analytical model of the form «movable foundation – manipulator – load». At the same time the mass of manipulator can be appreciably less than the mass of foundation (and of load if it is generally massive); degree of freedom drives possess of bounded capacity owing to apparent conditions; elastic deformations of manipulator construction (sections and joints) are possible and it should be taken into account while dynamics modeling and control synthesizing.

As indicated [31], foundation mobility caused by specific character of space application gives rise to a diversity of properties just as during operation of such systems (e.g. restrictions on mass and lag characteristics of manipulator transported load or requirements to system of active stabilization of foundation position), so also controlled movement dynamics modeling. We want to emphasize particularly practical urgency of modes characterized by a possibility to neglect all the powers and moments acting on the system, except control efforts produced by drives of degrees of freedom (on the active terminology – a «free-floating» mode), marked by a possibility to select in certain conditions an independent subsystem of system dynamics equations in joint position data in form analogous to dynamic equation form in the case of stationary foundation. It should be also pointed out that events of zero initial angular momentum and non-zero initial angular momentum of system (conserved permanent as a result of accepted assumptions) differ in workmanlike manner.

Operation modes of assembly and service self-contained robotic space modules

As mentioned above, multimode quality is distinguished as one of the most important signature of pending class of robot system - assembly and service self-contained robotic space modules. Let us consider as an example possible approach methods of such module to some object (mountable construction, serviced device, base station), taking into account the field experience of the «Mir» orbital station and the International Space Station (ISS).

1. Direct docking by means of docking device (system of pin-hole junction or androgynous docking mechanism). Manipulator is not enabled. Mutual movement of massive abutting objects and presence of nonzero relative speeds in the initial contact moment are proposed.

2. Docking by means of trapping by manipulator a module of object base assembly (similar, for example, to PDRF assemblies used in ISS), to which attachment is realized. Zero relative speed (line and angular) of massive abutting objects is intended. Mutual position of abutting objects after completion of trapping a base assembly by manipulator can be examined as final (objects are connected with the aid of controlled intermediate mechanism), or as intermediate supposing further mutual positioning using manipulator.

3. Docking of objects joined after the manner of preceding point by means of manipulator. In this case unlike direct docking mutual movement of abutting masses is provided not by movement control system and orientation of an active object (in the case under consideration a robot module), but by controlled mutual positioning using intermediate mechanism. An example of docking circuit in question is docking of objects with CBM assemblies using manipulator in ISS.

Different strategies of realization of assembly and service operations can be generated depending on functional capability of specific self-contained robot modules and combining of listed above docking methods.

Let us assume a presence of following stages of robot assembly of some large-dimensioned space construction of passive fragments:

1. Delivery of fragments to some intermediate position on orbit. It is possible to assume the delivery on specialized manipulator station.
2. Setting of fragments in ready state for assembly - extraction from transport compartement (with possible configuration modification).
3. Trapping of fragments by self-contained robotic space module.
4. Transportation of fragments by self-contained robotic space module to the assembling place.
5. Joining of delivered fragments to the mounted construction.

At the same time the degree of equipment of fragments by gripping mechanisms and docking devices is of the first importance.

In that case very different operation modes of self-contained robotic space module in respect to features of controlled movement dynamics can be single out, for example:

– controlled movement of a module without load («empty flight»);
– docking of a module with a manipulator station or a mounted construction without use of a manipulator;
– docking of a module with a manipulator station or a mounted construction using manipulator («trapping» of manipulator station by a manipulator with possible further module attachment;
– trapping by manipulator of fixed relatively to manipulator station module of a load also fixed relatively to manipulator station;
– trapping of a load vacant in inertial space by manipulator;
– controlled movement of a module with a load in hand of manipulator;
– controlled movement of a load relatively to foundation by means of manipulator with following strengthening of a load relatively to foundation («transport fixation»);
– controlled movement of a module with a load fixed on foundation;
– attachment of a module with a load to mounted construction with following segregation of a load by use of manipulator from foundation and installation in standard place;
– attachment of a load in conditions when the system «movable foundation – manipulator – load» moves easily relatively to mounted construction (under efforts applied from the direction of movement and foundation position control system or under efforts of driving gears of manipulator degree of freedom) in such a way that required starting conditions of docking would be provided at the instant of contact of a fragment with a construction.

It should be emphasized that the listed diversity of functioning modes is singled out within the framework of a procedure of orbital assembling. Realization of all the more variable service problems will apparently demand of additional examination of typical modes, including off-design modes. We may marked out, for example, a procedure of load rescue named in [27] where arbitrary motion of trapping object not equipped by engineered interfaces is generally proposed.

Summary

Demand for creation of prospective multitask expandable space systems expecting development of new classes of self-contained space robotics devices for its making, operation and utilization may be thought as sufficiently reasoned.

Class of assembly and service self-contained robotic space modules may be considered as very prospective amongst named devices; where diversity of possible operation modes is important feature of these devices.

Despite the experience accumulated in the space robotics field a potential multimode quality of these modules determines the necessity of additional research holding on its development and operation.

Particularly it is worthwhile to use the totality of assembly and service self-contained robotic space modules where each possesses a rational degree of universality, but is directed to preferred utilization in one of possible operation mode.

1. О некоторых перспективных направлениях развития космической робототехники / В.А. Лопота, Е.И. Юревич (сайт РКК «Энергия» http://www.energia.ru)

2. Этапы и перспективы развития модульного принципа построения робототехнических систем / А.В. Лопота, Е.И. Юревич // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2013. – № 1. – С. 98 – 103
3. Робототехническое обеспечение для объектов перспективной космической инфраструктуры / А.А. Градовцев, А.С. Кондратьев, А.Н. Тимофеев // Международная научно-техническая конференция «Экстремальная робототехника» 23–25 ноября 2011 г., ГНУ ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург – Электронный ресурс: http://er.rtc.ru
4. Ющенко А.С. Человек и робот – совместимость и взаимодействие // Робототехника и техническая кибернетика. 2014. № 1(2). С. 4 – 9.
5. Супервизорное управление космическими манипуляторами / В.П. Макарычев, Е.И. Юревич. — СПб.: Астерион, 2005. — 108 с.
6. Алпатов А.П., Белоножко П.А., Горбунцов В.В., Ивлев О.Г., Чернявская С.С., Шичанин В.Н. Динамика пространственно развитых механических систем изменяемой конфигурации – К.: Наукова думка, 1990. – 256 с.
7. The role of dexterous robotics in ongoing maintenance of the ISS / Lyndsey Poynter, P. Andrew Keenan // IAC-12,B3,4-B6.5,6,x16014
8. Flexible robot manipulators: modelling, simulation and control. - (IET control series) – ISBN 978-0-86341-448-0
9. Васильев В.В. Введение в орбитальное сервисное обслуживание. – К.: «Элмис», 2013, – 28 с., ил. ISBN 978-617-696-111-6
10. Тимофеев А.Н., Шардыко И.В. Проблемы применения в космосе антропоморфных роботов // Робототехника и техническая кибернетика. 2013. № 1. С. 37 – 41.
11. Яскевич А.В., Остроухов Л.Н., Егоров С.Н., Чернышев И.Е. Опыт полунатурной отработки причаливания российского модуля к Международной космической станции дистанционно управляемым манипулятором SSRMS // Робототехника и техническая кибернетика. 2013. № 1. С. 53 - 58.
12. Алпатов А.П., Белоножко П.А., Белоножко П.П., Григорьев С.В., Тарасов С.В., Фоков А.А. Моделирование динамики космических манипуляторов на подвижном основании // Робототехника и техническая кибернетика. 2013. № 1. С. 59 – 65.
13. Артеменко Ю.Н., Белоножко П.П., Карпенко А.П., Саяпин С.Н., Фоков А.А. Использование механизмов параллельной структуры для взаимного позиционирования полезной нагрузки и космического аппарата // Робототехника и техническая кибернетика. 2013. № 1. С. 65 – 71.
14. Особенности синтеза системы управления космическим манипулятором / А.П. Алпатов, П.А. Белоножко, П.П. Белоножко, С.В. Тарасов, А.А. Фоков // Актуальные проблемы авиационных и аэрокосмических систем. – 2010. – Т. 15, № 2(31). – С. 38 – 57.
15. Перспективы использования и особенности исследования динамики космических манипуляторов с упругими конструктивными элементами / А.П. Алпатов, П.А. Белоножко, П.П. Белоножко, Л.К. Кузьмина, С.В. Тарасов, А.А. Фоков // Техническая механика. – 2012. – № 1. – С. 82 – 93.
16. Згуровский М.З., Бидюк П.И. Анализ и управление большими космическими конструкциями / Национальный технический ун-т Украины "Киевский политехнический ин-т". – К.: Наукова думка, 1997. – 451с.
17. Баничук Н.В., Карпов И.И., Климов Д.М. и др. Механика больших космических конструкций. – М.: Факториал, 1997. – 302 с.
18. Медзмариашвили Э.В. Трансформируемые конструкции в космосе и на земле / Э. В. Медзмариашвили. – Тбилиси, 1995. – 446 с.
19. В.Ю. Рутковский, В.М. Суханов Большие космические конструкции: модели, методы исследования и принципы управления. I // Автоматика и телемеханика, 1996, выпуск 7, С. 52-65
20. В.Ю. Рутковский, В.М. Суханов Большие космические конструкции: модели, методы исследования и принципы управления. II // Автоматика и телемеханика, 1996, выпуск 8, С. 55-66
21. Земляков С.Д., Рутковский В.Ю., Суханов В.М. Некоторые проблемы управления при роботизированной сборке больших космических конструкций на орбите // Автоматика и телемеханика. 2006. № 8. С. 36 – 50.
22. Сыромятников В.С. Стыковочные устройства космических аппаратов. М.: Машиностроение, 1984. 216 с.
23. Сыромятников В.С. 100 рассказов о стыковке и других приключениях в космосе и на Земле. Часть 1: 20 лет назад. М.: Логос, 2003. 568 с.
24. Сыромятников В.С. 100 рассказов о стыковке и других приключениях в космосе и на Земле. Часть 2: 20 лет спустя. М.: Университетская книга; Логос, 2010. 568 с.
25. Космонавтика XXI века / под ред. Б.Е. Чертока – М. : РТСофт, 2010. – 864 с.

26. Moosavian S. Ali A., Papadopoulos E. Free-flying robots in space: an overview of dynamics modeling, planning and control // Robotica 2007. Volume 25. P. 537 – 547.
27. В.П. Богомолов, В.Ю. Рутковский, В.М. Суханов Проектирование оптимальной механической структуры свободнолетающего космического робототехнического модуля как объекта автоматического управления. I // Автоматика и телемеханика, 1998, выпуск 5, С. 27-40
28. Глумов В.М., Рутковский В.Ю., Суханов В.М. Анализ особенностей управления перелетами космического роботизированного модуля вблизи поверхности орбитальной станции. I Управление ориентацией модуля // Известия Академии наук. Теория и системы управления. 2002. № 2. С. 162 – 169.
29. Глумов В.М., Рутковский В.Ю., Суханов В.М. Анализ особенностей управления перелетами космического роботизированного модуля вблизи поверхности орбитальной станции. II Управление траекторными перемещениями модуля // Известия Академии наук. Теория и системы управления. 2002. № 3. С. 140 – 148.
30. В.Ю. Рутковский, В.М. Суханов, В.М. Глумов Управление многорежимным космическим роботом при выполнении манипуляционных операций во внешней среде // Автоматика и телемеханика, 2010, выпуск 11, С. 96-111
31. В.Ю. Рутковский, В.М. Суханов, В.М. Глумов Уравнения движения и управление свободнолетающим космическим манипуляционным роботом в режиме реконфигурации // Автоматика и телемеханика, 2010, выпуск 1, С. 80-98
32. В.Ю. Рутковский, В.М. Суханов, В.М. Глумов Некоторые задачи управления свободнолетающими космическими манипуляционными роботами I // Мехатроника, автоматизация, управление, 2010, № 10, С. 52-59
33. В.Ю. Рутковский, В.М. Суханов, В.М. Глумов Некоторые задачи управления свободнолетающими космическими манипуляционными роботами II // Мехатроника, автоматизация, управление, 2010, № 12, С. 54-65

П.П. Белоножко

ОСОБЕННОСТИ РЕЖИМОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ МОНТАЖНО-СЕРВИСНЫХ АВТОНОМНЫХ РОБОТИЗИРОВАННЫХ КОСМИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ

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

Введение

Перспективы космической робототехники связаны как с развитием отработанных прототипов в направлении расширения функциональных возможностей, так и с созданием новых классов систем, не имеющих на сегодняшний день эксплуатируемых аналогов. При этом уникальность объектов космической робототехники, экстремальные условия функционирования, затрудненность полномасштабной наземной отработки определяют многообразие конструктивных решений и широкий спектр задач исследований [1–15].

В целом можно считать разработку и использование робототехнических средств наиболее актуальными для обеспечения следующих тенденций развития космической техники:

– стремление к расширению функциональности;
– стремление к увеличению срока активной эксплуатации;
– стремление к повышению степени автономности;
– стремление к увеличению размеров с сохранением жесткости и прочности конструкции, ее несущей способности.

Важно отметить также, что за счет применения перспективных средств космической робототехники возможны как автоматизация операций, выполнение которых может быть обеспечено и другими средствами, с том числе при непосредственном участии человека, так и освоение качественно новых операций, решение которых в принципе невозможно без робототехнического обеспечения. При этом крупногабаритные многофункциональные наращиваемые космические системы могут быть выделены как класс перспективных космических объектов, реализуемость которых в ряде случаев может зависеть от возможности использования средств космической робототехники [16–25].

Выделим наиболее важные элементы конструктивного облика и особенности создания и эксплуатации многофункциональных наращиваемых космических систем, в том числе не имеющих аналогов и прототипов:

– значительные масса и габариты конструкции;

– модульный принцип построения, реконфигурируемость;
– ограничение функциональности модулей;
– использование как герметичных, так и негерметичных модулей;
– формирование окончательного облика системы в течение некоторого времени в соответствии с заранее разработанной стратегией;
– широкое использование трансформируемых элементов;
– поддержание работоспособности и изменение (расширение) функциональности за счет регулярного сервисного обслуживания, в частности, путем замены унифицированных блоков.

Очевидным примером реализованных систем рассматриваемого класса служат орбитальные станции. Рассматривая сами станции в качестве прообразов космических систем будущего, естественно полагать использовавшиеся при их создании и эксплуатации средства робототехники в качестве прототипов перспективных космических робототехнических систем. При этом следует отметить важную роль преемственности проектов и актуальность универсальных технологий, в первую очередь – технологии стыковки [22–24].

Концепция монтажно-сервисных автономных роботизированных космических модулей

Модульный принцип построения сложился еще на ранних этапах развития ракетно-космической техники, явившись естественным следствием целесообразности, а в ряде случаев и необходимости, выделения составных частей изделия, разнородных с конструктивной, технологической и функциональной точек зрения. Следует отметить, что идея сборки на орбите, в том числе автоматизированная с применением средств робототехники, также зародилась на заре развития практической космонавтики [22–25]. Таким образом, концепцию стыковки в космосе можно считать естественным логическим следствием модульного принципа построения космических объектов, а саму технологию стыковки – основой для развития перспективных роботизированных технологий орбитальной сборки.

При непосредственной стыковке с помощью стыковочного устройства средствами систем управления поступательным движением и ориентацией стыкуемых объектов на момент касания должны быть обеспечены требуемые начальные условия стыковки (взаимное положение и относительные линейная и угловая скорости). После касания стыковочное устройство последовательно обеспечивает амортизацию, компенсацию начального промаха, сцепку (образование первичной связи), выравнивание, стягивание, совмещение стыка с окончательным выравниванием, жесткое соединение. При этом требования к стыку могут предъявляться по точности, жесткости, прочности, герметичности [22].

В отличие от непосредственной стыковки, при стыковке с помощью установленного на одном из объектов манипулятора, захват второго объекта, являющийся аналогом сцепки стыковочным механизмом, может быть осуществлен при взаимной неподвижности стыкуемых объектов [22–24].

К достоинствам данного способа стыковки можно отнести:
– уменьшение ударных воздействий на стыкуемые объекты;
– снижение требований к управлению движением и ориентацией захватываемого объекта, неподвижность которого кроме режима «автономного зависания» может быть, в частности, обеспечена закреплением на некоторой базовой платформе;
– уменьшение риска повреждения стыкуемых объектов в случае промаха;
– отсутствие ограничений, накладываемых конечным временем взаимного сближения.

Таким образом, вполне логичной выглядит концепция монтажно-сервисных автономных роботизированных космических модулей, осуществляющих захват фрагментов собираемой конструкции, доставляющих их к месту сборки и устанавливающих в штатное положение при помощи манипулятора.

Проблемам разработки, создания и эксплуатации таких модулей посвящено значительное число публикаций [26–33]. Устройства, называемые «свободнолетающие космические манипуляционные роботы» [31–33], либо «свободнолетающие космические роботизированные модули» [27–29], как отмечается в [30–31], относятся к новому классу маломерных объектов космической техники, предназначенных для выполнения различных работ в открытом космосе, в том числе для сборки больших космических конструкций различного назначения, а также для технического обслуживания внешних устройств пилотируемых орбитальных станций и других функционирующих на орбите объектов. Как отмечается в [31], основные идеи и принципы проектирования свободнолетающих манипуляционных роботов были сравнительно давно сформулированы, теоретически развиты и частично реализованы. Вместе с тем отмечается многофункциональность и многорежимность подобных роботизированных модулей, отсутствие на сегодняшний день успешно эксплуатируемых прототипов, и как следствие, большое число недостаточно изученных задач.

Выделим наиболее общие элементы конструктивного облика монтажно-сервисных автономных роботизированных модулей:

– наличие подвижного основания – обладающего достаточно высокой степенью автономности космического модуля, способного самостоятельно перемещаться в космическом пространстве и приспособленного для контактного взаимодействия с другими космическими объектами, например, базовыми станциями, или монтируемыми (обслуживаемыми) объектами;
– наличие установленных на основании одного или нескольких манипуляторов, обеспечивающих возможность управляемого перемещения захваченного груза, в общем случае достаточно массивного, относительно основания.

Таким образом, рассматриваемый класс технических объектов может быть обобщенно идеализирован механической расчетной схемой вида «подвижное основание – манипулятор – груз». При этом масса манипулятора может быть существенно меньше массы основания (и груза, если груз достаточно массивен); приводы степеней подвижности в силу очевидных условий обладают ограниченной мощностью; возможны упругие деформации конструкции манипулятора (звеньев и сочленений), требующие учета при моделировании динамики и синтезе управления.

Как отмечается [31], обусловленная спецификой космического применения подвижность основания, порождает ряд характерных особенностей как при эксплуатации таких систем (например, ограничений на массо-инерционные характеристики переносимого манипулятором груза, или требований к системе активной стабилизации положения основания), так и при моделировании динамики управляемого движения. Особо подчеркнем практическую актуальность режимов, для которых возможно пренебречь всеми силами и моментами, действующими на систему, кроме управляющих усилий, создаваемых приводами степеней подвижности (по используемой терминологии – режим «free-floating»), для которых при определенных условиях возможно выделение независимой подсистемы уравнений динамики системы в шарнирных координатах в форме, аналогичной форме уравнений динамики для случая неподвижного основания. Следует также отметить важные качественные отличия случаев нулевого и ненулевого начального кинетического момента системы (сохраняющегося постоянным вследствие принятых предположений).

Режимы функционирования монтажно-сервисных автономных роботизированных космических модулей

Многорежимность, как было отмечено выше, выделяется в качестве одного из важных характерных признаков рассматриваемого класса робототехнических систем – монтажно-сервисных автономных роботизированных космических модулей. Рассмотрим в качестве примера возможные способы причаливания такого модуля к некоторому объекту (монтируемой конструкции, обслуживаемому аппарату, базовой станции), учитывая опыт эксплуатации орбитальной станции «Мир» и Международной космической станции (МКС).

1. Непосредственная стыковка при помощи стыковочного устройства (системы «штырь - конус », или андрогинного стыковочного узла). Манипулятор не задействуется. Предполагается взаимное движение массивных стыкуемых объектов и наличие ненулевых относительных скоростей на момент касания.

2. Стыковка путем захвата манипулятором модуля базового узла объекта (подобного, например, используемым на МКС узлам PDRF), к которому осуществляется пристыковка. Предполагается нулевая относительная скорость (линейная и угловая) массивных стыкуемых объектов. Взаимное положение стыкуемых объектов после завершения захвата манипулятором базового узла может рассматриваться как окончательное (объекты связаны посредством управляемого промежуточного механизма), либо как промежуточное, предполагающее дальнейшее взаимное позиционирование при помощи манипулятора.

3. Стыковка соединенных по схеме предыдущего пункта объектов при помощи манипулятора. В данном случае, в отличие от непосредственной стыковки, взаимное движение стыкуемых масс обеспечивается не системой управления движением и ориентацией активного объекта (в рассматриваемом случае роботизированного модуля), а управляемым взаимным позиционированием при помощи промежуточного механизма. Примером данной схемы стыковки может служить стыковка объектов к узлам CBM при помощи манипулятора на МКС.

В зависимости от функциональных возможностей конкретных автономных роботизированных космических модулей и комбинирования перечисленных выше способов стыковки могут быть сформированы различные стратегии осуществления монтажно-сервисных операций.

Предположим наличие следующих этапов роботизированного монтажа некоторой крупногабаритной космической конструкции из пассивных фрагментов:

1. Доставка фрагментов в некоторое промежуточное положение на орбите. Возможно предположить доставку к специализированной базовой станции.
2. Приведение фрагментов в состояние готовности к монтажу – извлечение из транспортного отсека (с возможным изменением конфигурации).
3. Захват фрагментов автономным роботизированным космическим модулем.
4. Транспортировка фрагментов автономным роботизированным космическим модулем к месту сборки.
5. Присоединение доставленных фрагментов к монтируемой конструкции.

При этом ключевую роль играет степень оснащенности фрагментов захватными интерфейсами и стыковочными узлами.

Тогда могут быть выделены весьма различающиеся с точки зрения особенностей динамики управляемого движения режимы функционирования автономного роботизированного космического модуля, например:

– управляемое движение модуля без груза («порожний полет»);
– стыковка модуля к базовой станции или монтируемой конструкции без использования манипулятора;
– стыковка модуля к базовой станции или монтируемой конструкции с использованием манипулятора («захват» базовой станции манипулятором с возможной последующей пристыковкой модуля);
– захват манипулятором закрепленного относительно базовой станции модуля груза, также закрепленного относительно базовой станции;
– захват манипулятором свободного в инерциальном пространстве груза;
– управляемое движение модуля с грузом в схвате манипулятора;
– управляемое перемещение при помощи манипулятора груза относительно основания с последующим закреплением груза относительно основания («транспортная фиксация»);
– управляемое движение модуля с грузом, закрепленным на основании;
– пристыковка модуля с грузом к монтируемой конструкции с последующим отсоединением при помощи манипулятора груза от основания и установкой на штатное место;
– пристыковка груза в режиме, когда система «подвижное основание – манипулятор – груз» свободно перемещается относительно монтируемой конструкции (под действием усилий, прикладываемых со стороны системы управления движением и положением основания, или под действием усилий приводов степеней подвижности манипулятора) таким образом, чтобы в момент контакта фрагмента с конструкцией были обеспечены требуемые начальные условия стыковки.

Следует подчеркнуть, что перечисленное многообразие режимов функционирования выделено в рамках процедуры орбитального монтажа. Реализация еще более разнообразных сервисных задач, очевидно, потребует дополнительного рассмотрения характерных режимов, в том числе нештатных. Можно выделить, например, упоминаемую в [27] процедуру спасения груза, предполагающую, в общем случае произвольное движение захватываемого объекта, не оснащенного специализированными интерфейсами.

Заключение

Потребность в создании перспективных многофункциональных наращиваемых космических систем, требующих для создания, эксплуатации и утилизации разработки новых классов автономных устройств космической робототехники можно считать достаточно аргументированной.

В ряду упомянутых устройств весьма перспективным можно считать класс монтажно-сервисных автономных роботизированных космических модулей, важной особенность которых является многообразие возможных режимов функционирования.

Несмотря на опыт, накопленный в области космической робототехники, потенциальная многорежимность таких модулей определяет необходимость проведения дополнительных исследований при их разработке, создании и эксплуатации.

В частности, целесообразным может быть использование совокупности монтажно-сервисных автономных роботизированных космических модулей, каждый из которых обладает разумной степенью универсальности, но ориентирован на предпочтительное использование в одном из возможных режимов функционирования.

1. О некоторых перспективных направлениях развития космической робототехники / В.А. Лопота, Е.И. Юревич (сайт РКК «Энергия» http://www.energia.ru)
2. Этапы и перспективы развития модульного принципа построения робототехнических систем / А.В. Лопота, Е.И. Юревич // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2013. – № 1. – С. 98 – 103
3. Робототехническое обеспечение для объектов перспективной космической инфраструктуры / А.А. Градовцев, А.С. Кондратьев, А.Н. Тимофеев // Международная научно-техническая конференция «Экстремальная робототехника» 23–25 ноября 2011 г., ГНУ ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург – Электронный ресурс: http://er.rtc.ru
4. Ющенко А.С. Человек и робот – совместимость и взаимодействие // Робототехника и техническая кибернетика. 2014. № 1(2). С. 4 – 9.
5. Супервизорное управление космическими манипуляторами / В.П. Макарычев, Е.И. Юревич. — СПб.: Астерион, 2005. — 108 с.
6. Алпатов А.П., Белоножко П.А., Горбунцов В.В., Ивлев О.Г., Чернявская С.С., Шичанин В.Н. Динамика пространственно развитых механических систем изменяемой конфигурации – К.: Наукова думка, 1990. – 256 с.
7. The role of dexterous robotics in ongoing maintenance of the ISS / Lyndsey Poynter, P. Andrew Keenan // IAC-12,B3,4-B6.5,6,x16014
8. Flexible robot manipulators: modelling, simulation and control. - (IET control series) – ISBN 978-0-86341-448-0
9. Васильев В.В. Введение в орбитальное сервисное обслуживание. – К.: «Элмис», 2013, – 28 с., ил. ISBN 978-617-696-111-6
10. Тимофеев А.Н., Шардыко И.В. Проблемы применения в космосе антропоморфных роботов // Робототехника и техническая кибернетика. 2013. № 1. С. 37 – 41.
11. Яскевич А.В., Остроухов Л.Н., Егоров С.Н., Чернышев И.Е. Опыт полунатурной отработки причаливания российского модуля к Международной космической станции дистанционно управляемым манипулятором SSRMS // Робототехника и техническая кибернетика. 2013. № 1. С. 53 - 58.
12. Алпатов А.П., Белоножко П.А., Белоножко П.П., Григорьев С.В., Тарасов С.В., Фоков А.А. Моделирование динамики космических манипуляторов на подвижном основании // Робототехника и техническая кибернетика. 2013. № 1. С. 59 – 65.
13. Артеменко Ю.Н., Белоножко П.П., Карпенко А.П., Саяпин С.Н., Фоков А.А. Использование механизмов параллельной структуры для взаимного позиционирования полезной нагрузки и космического аппарата // Робототехника и техническая кибернетика. 2013. № 1. С. 65 – 71.
14. Особенности синтеза системы управления космическим манипулятором / А.П. Алпатов, П.А. Белоножко, П.П. Белоножко, С.В. Тарасов, А.А. Фоков // Актуальные проблемы авиационных и аэрокосмических систем. – 2010. – Т. 15, № 2(31). – С. 38 – 57.
15. Перспективы использования и особенности исследования динамики космических манипуляторов с упругими конструктивными элементами / А.П. Алпатов, П.А. Белоножко, П.П. Белоножко, Л.К. Кузьмина, С.В. Тарасов, А.А. Фоков // Техническая механика. – 2012. – № 1. – С. 82 – 93.
16. Згуровский М.З., Бидюк П.И. Анализ и управление большими космическими конструкциями / Национальный технический ун-т Украины "Киевский политехнический ин-т". – К.: Наукова думка, 1997. – 451с.
17. Баничук Н.В., Карпов И.И., Климов Д.М. и др. Механика больших космических конструкций. – М.: Факториал, 1997. – 302 с.
18. Медзмариашвили Э.В. Трансформируемые конструкции в космосе и на земле / Э. В. Медзмариашвили. – Тбилиси, 1995. – 446 с.
19. В.Ю. Рутковский, В.М. Суханов Большие космические конструкции: модели, методы исследования и принципы управления. I // Автоматика и телемеханика, 1996, выпуск 7, С. 52-65
20. В.Ю. Рутковский, В.М. Суханов Большие космические конструкции: модели, методы исследования и принципы управления. II // Автоматика и телемеханика, 1996, выпуск 8, С. 55-66
21. Земляков С.Д., Рутковский В.Ю., Суханов В.М. Некоторые проблемы управления при роботизированной сборке больших космических конструкций на орбите // Автоматика и телемеханика. 2006. № 8. С. 36 – 50.
22. Сыромятников В.С. Стыковочные устройства космических аппаратов. М.: Машиностроение, 1984. 216 с.
23. Сыромятников В.С. 100 рассказов о стыковке и других приключениях в космосе и на Земле. Часть 1: 20 лет назад. М.: Логос, 2003. 568 с.

24. Сыромятников В.С. 100 рассказов о стыковке и других приключениях в космосе и на Земле. Часть 2: 20 лет спустя. М.: Университетская книга; Логос, 2010. 568 с.
25. Космонавтика XXI века / под ред. Б.Е. Чертока – М. : РТСофт, 2010. – 864 с.
26. Moosavian S. Ali A., Papadopoulos E. Free-flying robots in space: an overview of dynamics modeling, planning and control // Robotica 2007. Volume 25. P. 537 – 547.
27. В.П. Богомолов, В.Ю. Рутковский, В.М. Суханов Проектирование оптимальной механической структуры свободнолетающего космического робототехнического модуля как объекта автоматического управления. I // Автоматика и телемеханика, 1998, выпуск 5, С. 27-40
28. Глумов В.М., Рутковский В.Ю., Суханов В.М. Анализ особенностей управления перелетами космического роботизированного модуля вблизи поверхности орбитальной станции. I Управление ориентацией модуля // Известия Академии наук. Теория и системы управления. 2002. № 2. С. 162 – 169.
29. Глумов В.М., Рутковский В.Ю., Суханов В.М. Анализ особенностей управления перелетами космического роботизированного модуля вблизи поверхности орбитальной станции. II Управление траекторными перемещениями модуля // Известия Академии наук. Теория и системы управления. 2002. № 3. С. 140 – 148.
30. В.Ю. Рутковский, В.М. Суханов, В.М. Глумов Управление многорежимным космическим роботом при выполнении манипуляционных операций во внешней среде // Автоматика и телемеханика, 2010, выпуск 11, С. 96-111
31. В.Ю. Рутковский, В.М. Суханов, В.М. Глумов Уравнения движения и управление свободнолетающим космическим манипуляционным роботом в режиме реконфигурации // Автоматика и телемеханика, 2010, выпуск 1, С. 80-98
32. В.Ю. Рутковский, В.М. Суханов, В.М. Глумов Некоторые задачи управления свободнолетающими космическими манипуляционными роботами I // Мехатроника, автоматизация, управление, 2010, № 10, С. 52-59
33. В.Ю. Рутковский, В.М. Суханов, В.М. Глумов Некоторые задачи управления свободнолетающими космическими манипуляционными роботами II // Мехатроника, автоматизация, управление, 2010, № 12, С. 54-65

A. Ivanov

METHOD WITH THE OPERATED ROBASTNOST OF CALCULATION OF THE PSEUDO-RETURN MATRIX AND ITS APPLICATION IN PROBLEMS OF A ROBOTICS

St. Petersburg polytechnical university of Peter the Great; RTC, Saint-Petersburg
al_ivanov@rtc.r

А.А. Иванов

МЕТОД С УПРАВЛЯЕМОЙ РОБАСТНОСТЬЮ ВЫЧИСЛЕНИЯ ПСЕВДО ОБРАТНОЙ МАТРИЦЫ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ В ЗАДАЧАХ РОБОТОТЕХНИКИ

ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург
al_ivanov@rtc.ru

Введение

Проблема нахождения обратной матрицы или решения системы линейных уравнений подробно рассмотрена в классической литературе [1]. Для обращения квадратной матрицы полного ранга могут быть применены прямые и итерационные методы. Для прямоугольной матрицы всегда существует единственная псевдо обратная матрица, для нахождения которой используются методы сингулярных разложений и регуляризации [2, 3]. При численном обращении даже квадратной матрицы полного ранга существенное влияние на точность результата оказывает её обусловленность. Отсутствие точного нуля при выполнении вычислений с плавающей точкой делает невозможным точное определение ранга матрицы и корректное отделение вырожденных и плохо обусловленных матриц. Для обращения плохо обусловленных матриц используются методы регуляризации [3], которые требуют реализации итеративного подбора регуляризирующего параметра. Таким образом, проблема разработки неитерационного метода обращения (псевдообращения) матрицы до настоящего времени актуальна.

Необходимость обращения прямоугольных матриц возникает во многих прикладных задачах. В робототехнике наиболее известна обратная задача кинематики манипулятора, в которой необходимо нахождение шарнирных скоростей по задаваемым линейной и угловой скоростям переносимого тела.

Для манипулятора с кинематической избыточностью матрица имеет прямоугольный вид, при этом она может иметь неполный ранг [4, 5]. Вырождение матрицы происходит в точках сингулярности, и при выходе шарнирных координат на границы допустимого диапазона.

При взаимодействии тела с поверхностью возникают положения, в которых количество ограничений превышает число независимых уравнений. В работе автора [6] рассмотрена задача со статической неопределимостью, возникающая при моделировании движения робота вертикального перемещения по шероховатой поверхности и предложен алгоритм решения с использованием аппарата псевдо-обратных матриц. Следует отметить, при специальном расположении контактирующих точек, матрица системы уравнений имеет неполный ранг, что проявляется через плохую обусловленность системы уравнений и появлению физически необоснованных решений. Предлагаемый метод обращения позволяет находить псевдо-решение, с управляемой грубостью (робастностью).

Метод псевдо обращения матрицы произвольного ранга

Рассмотрим задачу решения в поле действительных чисел системы линейных уравнений

$$A X = Q \tag{1}$$

с прямоугольной матрицей A. Псевдо обратной матрицей произвольного ранга называется [3] матрица

$$A^{+} = \lim_{\varepsilon \to 0}(A^{T}\,(A A^{T} + \varepsilon E)^{-1}) = \lim_{\varepsilon \to 0}((A^{T} A + \varepsilon E)^{-1} A^{T}), \tag{2}$$

определяющая для системы уравнений (1) псевдо-решение с минимальной нормой

$$X^{+} = A^{+} Q. \tag{3}$$

Выбор представления псевдо-обратной матрицы определяется из условия минимума размерности одной из неотрицательно определённых матриц $B^{*} = A A^{T}$ или $B^{**} = A^{T} A$. Не умаляя общности, положим $B = B^{*}$ и будем искать псевдо обратную матрицу в виде

$$A^{+} = A^{T} \lim_{\varepsilon \to 0}((B + \varepsilon E)^{-1}) = A^{T} \lim_{\varepsilon \to 0}(B_{\varepsilon}^{-1}). \tag{4}$$

Согласно теореме Гамильтона-Кэли [1]

$$\sum_{j=0}^{n}(-1)^{j} I_{j} B^{n-j} = \sum_{j=0}^{n}(-1)^{j} I_{j}(B_{\varepsilon} - \varepsilon E)^{n-j} = \sum_{j=0}^{n}\sum_{i=0}^{n-j}(-1)^{j+i} C_{n-j}^{i} I_{j} B_{\varepsilon}^{n-j-i} \varepsilon^{i} = 0. \tag{5}$$

Из равенства (5) может быть получено выражение для обратной матрицы регуляризованной матрицы B_{ε} n-го порядка как матричной дробно-рациональной функции параметра регуляризации ε с коэффициентами, зависящими от исходной матрицы B и её ортогональных инвариантов I_{j}

$$(B + \varepsilon E)^{-1} = \sum_{i=0}^{n-1} \varepsilon^{i} \sum_{j=0}^{n-1-i}(-1)^{n-1-i-j} I_{j} B^{n-1-i-j} / (\sum_{j=0}^{n} \varepsilon^{j} I_{n-j}). \tag{6}$$

Инварианты I_{j} определяются рекуррентными формулами Ньютона

$$I_{j} = -(-1)^{j}(\sum_{k=0}^{j-1}(-1)^{k} I_{k} \operatorname{Tr} B^{j-k}) / j, \quad I_{0} = 1, \quad j = 1, \ldots, n \tag{7}$$

и образуют монотонную неотрицательную убывающую с возрастанием индекса j последовательность

$$0 \le I_{j} \le (I_{j-1} I_{1}), \quad j = 2, \ldots, n. \tag{8}$$

Справедливость утверждения (8) вытекает из неотрицательности спектра собственных чисел матрицы B и обобщённой теоремы Виета для корней характеристического уравнения.

Для матрицы A полного ранга матрица B - невырожденная и

$$\lim_{\varepsilon \to 0}(B_{\varepsilon}^{-1}) = B^{-1} = \sum_{j=0}^{n-1}(-1)^{n-1-j} I_{j} B^{n-1-j} / I_{n}. \tag{9}$$

В случае m-кратной вырожденности матрицы B нулю равны m последних коэффициентов характеристического полинома $I_{n} = I_{n-1} = \ldots = I_{n-m+1} = 0$. Тогда формула (6) приобретает вид

$$(B + \varepsilon E)^{-1} = \sum_{i=m}^{n-1} \varepsilon^{i-m} \sum_{j=0}^{n-1-i}(-1)^{n-1-i-j} I_{j} B^{n-1-i-j} / (\sum_{j=0}^{n-m} \varepsilon^{j} I_{n-m-j}). \tag{10}$$

Предел выражения (10) даёт подстановка $\varepsilon = 0$

$$\lim_{\varepsilon\to 0}(B_\varepsilon^{-1}) = \sum_{j=0}^{n-1-m}(-1)^{n-1-m-j} I_j B^{n-1-m-j} / I_{n-m}, \tag{11}$$

а $n-m=r$ - ранг матрицы B. При численном нахождении инвариантов, например по формуле (7), вероятность получения точного равенства нулю инварианта I_j равна нулю. При заданном уровне чувствительности δ из выполнения неравенства

$$0 \le I_{n-m+1} / I_1^{n-m+1} \le \delta \tag{12}$$

и монотонности последовательности (8) необходимо следует

$$0 \le I_{n-m+1+l} / I_1^{n-m+1+l} \le \delta,\ l=1,m-1. \tag{13}$$

Обусловленность матрицы, обычно определяемая как отношение максимального и минимального собственных чисел, может быть оценена по отношению

$$I_{r_\delta} / (I_{r_\delta -1} I_1) \le \delta \ll 1. \tag{14}$$

Выполнение неравенства (14) указывает на то, что в определяющей I_{r_δ} сумме $C_n^{r_\delta}$ произведений r_δ собственных чисел матрицы B все произведения содержат множитель, существенно меньший любого из предшествующих собственных чисел. При этом максимальное слагаемое равно произведению r_δ первых, упорядоченных по убыванию собственных чисел, принадлежащих отрезку $[0, I_1]$. Величина, обратная δ, задаёт максимально допускаемую обусловленность, а число r_δ определяет приближённую оценку ранга матрицы B, как номера первого из инвариантов, для которого выполняется неравенство (14). С учётом предложенного критерия оценки ранга матрицы B предел (10) задаётся соотношением

$$\lim_{\varepsilon\to 0}(B_\varepsilon^{-1}) = B_\delta^{-1} = \sum_{j=0}^{r_\delta -1}(-1)^{r_\delta -1-j} I_j B^{r_\delta -1-j} / I_{r_\delta}. \tag{15}$$

Если вследствие ошибок округления $I_{r_\delta} < 0$, то B_δ^{-1} определяется по формуле (15) при r_δ на единицу меньше. Такой же приём следует применить, если $I_{r_\delta} / (I_{r_\delta -1} I_1) \le \gamma\delta$, где $\gamma \approx 0.1$, так как это признак почти вырожденной матрицы. Формулы (3), (4), (7), (14) и (15) позволяют определить следующий алгоритм поиска робастной псевдо-обратной матрицы.

1. Вычисляем матрицу $B = A A^T$

2. По рекуррентной формуле (7) вычисляется набор коэффициентов I_j для $j=1,2,\dots n$ до тех пор, пока не выполнится неравенство (14) или $j=n$.

3. Обратная матрица B_δ^{-1} по уровню δ вычисляется по формуле (15), а для $I_{r_\delta} / (I_{r_\delta -1} I_1) \le \gamma\delta$, r_δ уменьшается на единицу.

4. Матрица, удовлетворяющая определению псевдо-обратной матрицы, имеет вид

$$A_\delta^+ = A^T B_\delta^{-1} = \sum_{j=0}^{r_\delta -1}(-1)^{r_\delta -1-j} I_j A^T (A A^T)^{r_\delta -1-j} / I_{r_\delta} = B_\delta^{-1} A^T = A_\delta^+. \tag{16}$$

5. Псевдо-решение задают формулы

$$X_\delta^+ = A^T Y_\delta = A^T \sum_{j=0}^{r_\delta -1}(-1)^{r_\delta -1-j} I_j Y_j / I_{r_\delta}, \tag{17}$$

$$Y_0 = Q,\ Y_j = B Y_{j-1}. \tag{18}$$

В описанной процедуре нахождения решения системы уравнений (1) для определения инвариантов I_j по формуле (7) требуется вычисление последовательных степеней матрицы B, т.е. процедура имеет вычислительную сложность n^4; применение более экономичных методов вычисления инвариантов (например, метод А. Н. Крылова) уменьшит вычислительную сложность процедуры нахождения псевдо обратной матрицы до n^3. Из формулы (14) следует, что для плохо обусловленных или почти вырожденных матриц необходимое число степеней матрицы B меньше порядка матрицы.

Рассмотренный алгоритм вычисления обратной матрицы (15) может быть модифицирован на основе алгоритма обращения матриц Леверье-Фадеева [1], На рисунке 1 приведен код предложенного алгоритма вычисления псевдообратной матрицы с границей обусловленности 1/d для ненулевой матрицы A, произвольного ранга и размера $(m\times n)$ с использованием теоремы Гамильтона-Кэли и алгоритма Леверье-Фадеева

```
AT=Transpose[A]; n=Length[A[[1]]]; m=Length[AT[[1]]]; nB= Min[m,n];
E0=IdentityMatrix[nB]; B=If[m<=n,A.AT,AT.A]; r=1; TrB=Tr[B];
B=B/TrB;
Br1=E0; Bj=B;
Label[repeat]; r=r+1;Br=-(Bj-ir1*E0); Bj=B.Br; ir=Tr[Bj]/r;
If[ir<=(ir1*d),
   If[ir<=0.1*(ir1*d),r=r-1;k=-1,k=0],
   Br1=Br; ir1=ir; If[r<nB, Goto[repeat], k=1]];
APSI=If[m<=n, AT.Br1/(ir1*TrB),Br1.AT/(ir1*TrB)];
```

Рис. 1. Алгоритм псевдо-обращения на языке Mathematica

Формулировка и решение задачи определения реакций избыточных связей

Задача пространственного равновесия несвободного твёрдого тела является статически определимой при условии не более шести независимых связей. Реакции могут быть найдены из условий равновесия твердого тела. Статически неопределимые задачи требуют привлечения дополнительных условий. В технической механике в качестве таких условий выступают условия совместности линейных упругих деформаций тела, т.е. перехода к более сложной, чем твёрдое тело, механической модели. Однако при формализации задачи равновесия может оказаться физически более обоснованным допущение о деформируемости элементов, ограничивающих перемещение рассматриваемого твёрдого тела. В этой постановке в качестве дополнительных уравнений выступают условия совместимости деформаций «опор».

Рассмотрим задачу равновесия несвободного твёрдого тела под действием произвольной системы сил. Уравнения равновесия могут быть представлены в виде

$$\begin{gathered}\sum_{k=1}^{n}\lambda_k X_k \bar{v}_k = -\bar{V}^a,\\ \sum_{k=1}^{n}\lambda_k X_k \bar{\rho}_k\times\bar{v}_k = -\bar{M}_O^a\end{gathered} \tag{19}$$

Здесь обозначено: $\bar{V}^a$, $\bar{M}_O^a$ - главный вектор и главный момент относительно центра приведения задаваемых сил; $\bar{\rho}_k$ - радиус-векторы точек приложения реакций связей, определяемых заданным ортом направления и X_k -неизвестной проекцией на орт $\bar{v}_k$; λ_k - параметр, позволяющий рассматривать связь односторонней или не активированной. Заменив связи деформируемыми в направлении $\bar{v}_k$ опорами, мы можем считать их реакции пропорциональными проекциям возможных перемещений точек $\bar{\rho}_k$ на орты $\bar{v}_k$

$$X_k = -c\,\lambda_k\,\bar{v}_k\cdot\delta\bar{r}_k = -c\lambda_k\;\bar{v}_k\cdot\delta\bar{r}_O - c\lambda_k\;(\bar{\rho}_k\times\bar{v}_k)\cdot\delta\bar{\varphi},\;\; k=\overline{1,n}. \tag{20}$$

Подстановка (20) в (19) даёт систему шести уравнений с шестью неизвестными

$$\begin{gathered}\sum_{k=1}^{n}(\lambda_k^2\,\bar{v}_k\;\bar{v}_k)\cdot\delta\bar{r}_O + \sum_{k=1}^{n}(\lambda_k^2\bar{v}_k\,(\bar{\rho}_k\times\bar{v}_k))\cdot\delta\bar{\varphi} = \bar{V}^a/c,\\ \sum_{k=1}^{n}\lambda_k^2\,(\bar{\rho}_k\times\bar{v}_k)\;\bar{v}_k\cdot\delta\bar{r}_O + \sum_{k=1}^{n}\lambda_k^2(\,\bar{\rho}_k\times\bar{v}_k)\,(\bar{\rho}_k\times\bar{v}_k)\cdot\delta\bar{\varphi} = \bar{M}_o^a/c.\end{gathered} \tag{21}$$

Решение системы уравнений (20)-(21) является псевдо-решением системы уравнений (19), так как если записать её в матричном виде

$$A\,X = \begin{pmatrix}\lambda_1\,\bar{v}_1, & \lambda_2\,\bar{v}_2, & \dots & \lambda_n\,\bar{v}_n\\ \lambda_1\,\bar{\rho}_1\times\bar{v}_1, & \lambda_2\,\bar{\rho}_2\times\bar{v}_2, & \dots & \lambda_n\,\bar{\rho}_n\times\bar{v}_n\end{pmatrix}\begin{pmatrix}X_1\\ X_2\\ \dots\\ X_n\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}-\bar{V}^a\\ -\bar{M}_o^a\end{pmatrix} = Q \tag{22}$$

и отыскивать решение в виде

$$X = A^T Y = -\begin{pmatrix} \lambda_1\,\overline{v}_1, & \lambda_1\,\overline{\rho}_1\times\overline{v}_1 \\ \lambda_2\,\overline{v}_2, & \lambda_2\,\overline{\rho}_2\times\overline{v}_2 \\ \vdots & \vdots \\ \lambda_n\,\overline{v}_n, & \lambda_n\,\overline{\rho}_n\times\overline{v}_n \end{pmatrix}\begin{pmatrix} \cdot\delta\overline{r}_O \\ \cdot\delta\overline{\varphi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} & a_{16} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} & a_{26} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & a_{n4} & a_{n5} & a_{n6} \end{pmatrix}\begin{pmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \\ Y_4 \\ Y_5 \\ Y_6 \end{pmatrix}, \tag{23}$$

$$A\,A^T Y = -\begin{pmatrix} \lambda_1\,\overline{v}_1, & \dots & \lambda_n\,\overline{v}_n \\ \lambda_1\,\overline{\rho}_1\times\overline{v}_1, & \dots & \lambda_n\,\overline{\rho}_n\times\overline{v}_n \end{pmatrix}\begin{pmatrix} \lambda_1\,\overline{v}_1, & \lambda_1\,\overline{\rho}_1\times\overline{v}_1 \\ \vdots & \vdots \\ \lambda_n\,\overline{v}_n, & \lambda_n\,\overline{\rho}_n\times\overline{v}_n \end{pmatrix}\begin{pmatrix} \cdot\delta\overline{r}_O \\ \cdot\delta\overline{\varphi} \end{pmatrix} =$$

$$= \begin{pmatrix} -\sum_{k=1}^{n}\lambda_k^2\,\overline{v}_k\;\overline{v}_k, & -\sum_{k=1}^{n}\lambda_k^2\,\overline{v}_k\overline{\rho}_k\times\overline{v}_k \\ -\sum_{k=1}^{n}\lambda_k^2\;\overline{\rho}_k\times\overline{v}_k\;\overline{v}_k, & -\sum_{k=1}^{n}\lambda_k^2\;\overline{v}_k\times\overline{\rho}_k\;\overline{v}_k\times\overline{\rho}_k \end{pmatrix}\begin{pmatrix} \cdot\delta\overline{r}_O \\ \cdot\delta\overline{\varphi} \end{pmatrix} = BY = \begin{pmatrix} -\overline{V}^a \\ -\overline{M}_o^a \end{pmatrix} = Q \quad , \tag{24}$$

то системы уравнений (22), (24) и (19), (21) идентичны.

Уравнения вида (20)-(24) рассматривались в работе автора [6] применительно к задаче определения реакций опорной вертикальной плоскости, действующих на четыре опорных колеса робота вертикального перемещения. Направляющие орты нормальных реакций колинеарны, что приводит к вырождению матрицы системы (24)

Отметим, что под задаваемыми силами в уравнениях (19) могут подразумеваться и силы инерции, а в качестве искомых реакций X_i могут выступать управляющие воздействия в заданных направлениях. Такая задача в робототехнике может возникать при синтезе управлений летательного или подводного аппарата. При колинеарности и приближённой колинеарности ортов $\overline{v}_k$ матрица $A\,A^T$ - вырожденная или близка к таковой.

Обратная задача кинематики гиперизбыточного манипулятора

Скоростная обратная задача кинематики манипулятора из n тел-звеньев, связанных одностепенными шарнирами с осями, задаваемыми ортами $\overline{l}_i$ и расположенных в точках i и $i+1$ тела, связанных радиус-вектором $\overline{\rho}_i$ (радиус вектор $\overline{\rho}_n$ задаёт положение концевой точки на теле с номером n) формализуется системой двух векторных уравнений с n неизвестными угловыми скоростями вращения шарниров.

$$\overline{\omega}_n = \sum_{i=1}^{n}\overline{l}_i\,\dot{\varphi}_i \tag{25}$$

$$\overline{v}_n = \sum_{j=1}^{n}\sum_{i=1}^{j}\dot{\varphi}_i\overline{l}_i\times\overline{\rho}_j = \sum_{i=1}^{n}\dot{\varphi}_i\overline{l}_i\times\sum_{j=i}^{n}\overline{\rho}_j = \sum_{i=1}^{n}\dot{\varphi}_i\;\overline{r}_i\times\overline{l}_i,\;\; \overline{r}_i = -\sum_{j=i}^{n}\overline{\rho}_j \tag{26}$$

В матричной записи система уравнений имеет вид

$$A\,X = \begin{pmatrix} \overline{l}_1 & \overline{l}_2 & \dots & \overline{l}_n \\ \overline{r}_1\times\overline{l}_1 & \overline{r}_2\times\overline{l}_2 & \dots & \overline{r}_n\times\overline{l}_n \end{pmatrix}\begin{pmatrix} \dot{\varphi}_1 \\ \dot{\varphi}_2 \\ \dots \\ \dot{\varphi}_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \overline{v}_n \\ \overline{\omega}_n \end{pmatrix} = Q\,, \tag{27}$$

Ограниченность диапазона изменения шарнирных координат манипулятора может быть учтена введением новых координат с помощь непрерывно дифференцируемой ограниченной функции [5], например, для симметричного диапазона

$$\varphi_i = \varphi_{0i}\,\mathrm{th}\,\vartheta_i\,. \tag{28}$$

Дифференцирование по времени равенства (29) даёт связь обобщённых скоростей

$$\dot{\varphi}_i = (\varphi_{0i}^2 - \varphi_i^2)\dot{\vartheta}_i\,/\,\varphi_{0i} = \mu_i(\dot{\varphi}_i)\dot{\vartheta}_i\,, \tag{29}$$

с учётом которой уравнение для новых переменных $\dot{\vartheta}_i$ имеет вид

$$A X = \begin{pmatrix} \mu_1 \bar{l}_1 & \mu_2 \bar{l}_2 & \dots & \mu_n \bar{l}_n \\ \mu_1 \bar{r}_1 \times \bar{l}_1 & \mu_2 \bar{r}_2 \times \bar{l}_2 & \dots & \mu_n \bar{r}_n \times \bar{l}_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\vartheta}_1 \\ \dot{\vartheta}_2 \\ \dots \\ \dot{\vartheta}_n \end{pmatrix} = Q . \quad (30)$$

Из (28) и (29) ясно, что при стремлении φ_i к граничному значению к нулю стремится соответствующий столбец матрицы A и при выходе на ограничение более $n-6$ координат матрица A становится плохо определённой (стремится к матрице неполного ранга). Второй причиной приближённого вырождения A является приближённая колинеарность ортов $\bar{l}_i$, $\bar{l}_j$ и $\bar{r}_i$, $\bar{r}_j$.

Заключение

Предложенный метод нахождения псевдо-решения является прямым и нечувствительным к возмущениям, не превосходящим заданный порог, т.е. может быть использован в алгоритмах управления реального времени на вычислительных платформах с ограниченной разрядностью и фиксированной арифметикой. Метод применим к матрицам неполного ранга, включая случаи приближённого вырождения и плохой обусловленности. С его помощью могут быть успешно решены задачи, возникающие в механике и робототехнике.

1. Гантмахер Ф.Р. Теория матриц // 2-е изд., доп. — М.: "Наука", 1966. — 576 с.
2. Бояринцев Ю.Е., Данилов В.А., Логинов А.А., Чистяков В.Ф. Численные методы решения сингулярных систем. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд., 1989. – 224 с.
3. Тихонов А.Н. О некорректных задачах линейной алгебры и устойчивом методе их решения // ДАН СССР, 1965, т. 163, № 3, с. 591-594
4. B. Siciliano and O. Khatib, “Springer Handbook of Robotics”, 1st ed., Springer 2008, - 1611c. ISBN 978-3540239574.
5. Иванов А.А. Метод планирования формы гиперизбыточного манипулятора с ограниченным диапазоном изменения шарнирных координат// Научно-технические ведомости СПбГПУ. Серия «Информатика Телекоммуникации Управление»». Выпуск 6 (163) 2012. сс. 112-118
6. Иванов А.А., Чупров С.Г. Моделирование динамики разворота РВП на колесной платформе с четырьмя независимыми приводами//Экстремальная робототехника. Труды международной научно-технической конференции. – Санкт-Петербург: Изд-во «Политехника-сервис», 2014. – сс.147-152

I. Fomin

PROJECT OF AN INTELLIGENT PARAMETERS TUNING TOOL FOR A VIDEO ANALYTICS SYSTEMS

RTC, Saint-Petersburg, Russia
i.fomin@rtc.ru

И.С. Фомин

АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РЕЖИМА ДВИЖЕНИЯ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА ПО ВИДЕОПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ С ФРОНТАЛЬНОЙ КАМЕРЫ

ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург
i.fomin@rtc.ru

Введение

Мобильные роботы чаще всего решают задачи, при выполнении которых они перемещаются вне поля зрения оператора. Одной из важных проблем при создании таких роботов является построение системы управления, позволяющей роботу избегать столкновения с препятствиями. Возможно использовать при работе различные подходы – использование лазерных дальномеров, ультразвуковых устройств, современных сенсоров Kinect® и PrimeSense®.Каждый из этих подходов имеет свои достоинства и недостатки, но все он требуют установки дополнительного оборудования. С другой стороны, почти на любом мобильном роботе устанавливаются одна или несколько камер для удобства управления.

Существуют различные подходы для обнаружения объектов при движении по камере, установленной на роботе. Некоторые из них работают на основе оригинального подхода, разработанного авторами, и не имеют общей основы - [1], [2] с использованием данных о глубине в каждом пикселе, [3] с использованием данных кодирования видеопоследовательности или [4] на основе обученных детекторов и метода TLD.

Другая группа методов основывается на использовании особых точек. Для их обнаружения используется метод Ши и Томаси [5], и особыми точками считаются особенности в том смысле как они описаны в этой статье, для сопровождения их между кадрами применяется метод Лукаса-Канаде[6]. В работе [7] оптический поток используется для определения смещения камеры между кадрами, авторы статьи [8] демонстрируют выделение движущихся объектов в кадре при прямолинейном движении; в работе [9]продемонстрировано использование особых точек для предупреждения водителя о возможности столкновения во время парковки.

Все приведенные методы используют только данные с камеры и функционируют по одному и тому же алгоритму вне зависимости от режима движения транспортного средства. Исследование приведенных методов показывает, что некоторые из них функционируют лучше при прямолинейном движении, некоторые - при повороте.

Знание режима движения транспортного средства позволит выбрать более эффективный метод. Если нельзя получить данные о режиме движения от одометрии, возможно определить режим движения исключительно по видеоизображению.

Постановка задачи

До начала построения системы принято решение об использовании подхода с использованием оптических потоков. Необходимо выполнить сопровождение особых точек между кадрами с использованием методов Ши и Томаси и Лукаса-Канаде. Кроме того, требуется сохранить данные о траектории движения особых точек, так как для достоверного определения режима движения нужно использовать информацию за несколько последних кадров. С учетом этой информации требуется построить алгоритм, позволяющий определить, как двигается транспортное средство.

Алгоритм поиска и сопровождения точек

На вход алгоритма выделения и сопровождения особых точек поступают: входное изображение, зоны обнаружения и параметры методов обнаружения точек. На выходе алгоритма формируются массивы точек: «сырые» особые точки, без какой-либо фильтрации, точки, распределенные по зонам обнаружения, точки, разделенные на 9 направлений.

Приведем подробную блок-схему алгоритма модуля для выделения и сопровождения особых точек (см. рисунок 1), и опишем шаги, присутствующие на схеме.

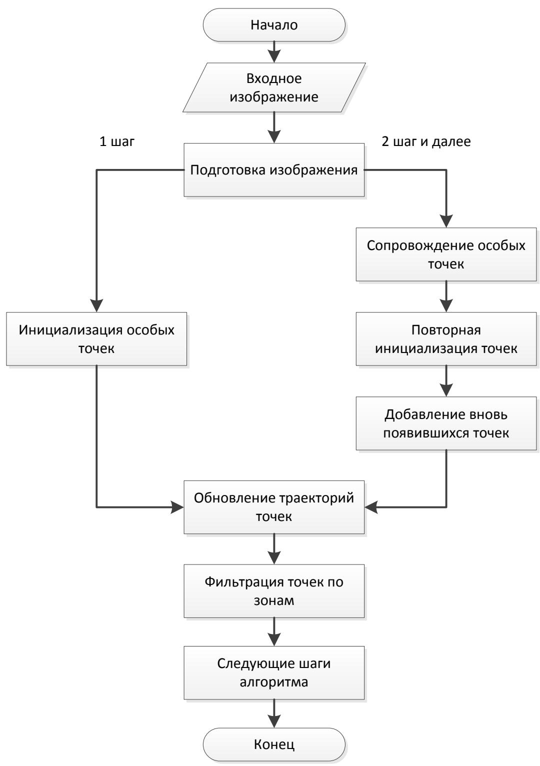


Рис. 1. Алгоритм выделения и сопровождения особых точек

В начале работы алгоритма на вход поступает неподготовленное изображение, которое переводится в оттенки серого,затем уменьшается в 4 раза и проходит процедуру фильтрации, после чего результат поступает на вход методов обнаружения и сопровождения особых точек.

Для обнаружения новых особых точек на каждом из шагов работы в соответствии со значением специального параметра выбирается алгоритм Ши и Томаси[5].

На первом шаге производится только инициализация особых точек в соответствии с одним из этих методов, на втором и последующих шагах тот же метод используется для выделения вновь появившихся особых точек.

Сопровождение уже найденных ранее особенностей на втором и последующих шагах выполняется с использованием алгоритма Лукаса-Канаде. Вновь найденные на каждом шаге точки относятся к новым и добавляются в список со скоростями и траекториями равными нулю, если расстояние от вновь найденной точки до любой из уже имеющихся в списке больше, чем минимально допустимая дистанция между точками.

Для всех точек, для которых известны параметры движения, производится сохранение траектории за несколько последних кадров. На первом шаге все траектории представляют собой пустые массивы, на втором и последующих шагах к траекториям добавляются смещения сопровожденных точек. Таким образом, на каждом шаге при расчете скорости точки анализируется не только ее текущее положение и мгновенная скорость, но и значения этих параметров для предыдущих кадров. Эти детали реализации алгоритма позволили существенно повысить качество определения параметров для каждой точки. Это позволяет избежать случайных ошибок при выделении отдельных объектов и определении направления их движения, то есть делает алгоритм более устойчивым к выбросам.

Если в алгоритм переданы зоны обнаружения и параметр, указывающий, что точки должны обнаруживаться в соответствии с этими зонами, то в алгоритме формируется специальная маска, которая блокирует любое обнаружение вне этих зон.

Кроме того, выполняется разделение зон по направлениям, формируется список углов, в пределах которых должна лежать та или иная зона. После чего рассчитываются мгновенные скорости точек, представляющие собой разницу положений точек на текущем и предыдущем кадре и скорости точек по итогам расчета траектории. На основе этих скоростей вычисляются направления движения, вектор направлений движения на последнем кадре и соответствующий вектор направлений движения по итогам обработки траектории.

Если угол попадает в соответствующий интервал углов, точка включается в соответствующий вектор разбиения по направлениям, а если мгновенная скорость точки равна нулю, то точка относится к стоячим.

Следует также сделать несколько замечаний относительно других параметров, которые учитываются в данном алгоритме:

– длина траектории точки даже при очень стабильном сопровождении не может составлять более чем максимальная длина траектории;
– если длина траектории достаточна, то используется специальный параметр, определяющий число точек, которые не учитываются при определении скорости и направления на основе трактории;
– если точка сместилась за кадр не более чем на особый параметр по горизонтали или по вертикали соответственно, то она считается оставшейся на месте;
– точки, время существования которых в мс больше, чем значение максимального времени жизни, автоматически исключаются из списка во избежание возможного накопления ошибок.

Алгоритм вычисления режима движения

Рассмотрим более подробно алгоритм определения режима движения транспортного средства.

Входными данными являются: положения особых точек, средние скорости особых точек за последние несколько кадров, границы прямоугольника, в котором анализируются скорости точек, количество кадров по которому производится анализ поворота, число выбросов при анализе поворота, мертвая зона при анализе поворота.

В центре кадра задается зона, внутри которой должны располагаться точки, по которым производится анализ режима движения. Предполагается, что кадр покрыт точками достаточно равномерно и некоторое их число всегда оказывается в этой зоне.

Для точек внутри зоны, суммируются и усредняются скорости по горизонтальной оси отдельно справа и слева от центра зоны и изображения. Это необходимо, так как с одной из сторон может быть больше точек (более текстурированная поверхность в кадре) и это может внести ошибку в вычисления. Кроме того, для некоторых сцен требуется вводить коэффициенты умножения слева и справа.

После этого средние скорости точек в левой и правой части зоны складываются для получения значения, которое указывает на направление движения. Если посмотреть на график изменения этого значения (Рис. 2), то можно четко увидеть моменты отклонения от центра, указывающие на нахождение транспортного средства в состоянии поворота. Для получения аналога реле вводятся параметры мертвой зоны, при выходе за которую считается, что в данный момент, на текущем кадре происходит поворот. В зависимости от этого формируется текущее значение состояния поворота.

Значения режима движения записываются в вектор на каждом из шагов. Если размер вектора больше допустимого значения, то анализируется последние кадры, номер которых меньше допустимого значения. Если все кадры кроме нескольких выбросов (число которых является параметром) принадлежат одному из направлений, считается, что транспортное средство выполняет поворот в этом направлении, иначе считается, что оно двигается прямо.

Тестирование

На Рис. 2 представлен график изменения значения, указывающего на направление движения. Оно получается путем сложения средних скоростей точек в левой и правой части окна поиска с учетом поправочных коэффициентов. На графике заметны явные отклонения от нуля показывающие моменты, когда транспортное средство, на котором установлена камера, отклоняется от прямолинейного движения. Путем регулировки параметра мертвой зоны можно определить границы, при выходе за которые будет подан сигнал о том, что транспортное средство находится в состоянии поворота.

За счет изменения параметров числа кадров для определения поворота, допустимого числа выбросов и мертвой зоны можно регулировать работу алгоритма в процессе определения поворота. Примеры влияния параметров приведены на рисунке 3. Линии на графиках состоят из точек, каждая точка соответствует режиму движения, определенному на данном кадре. Если точка находится вверху, транспортное средство поворачивает влево, если внизу, то вправо, если находится посередине – транспорт движется прямолинейно. На графиках приведены результаты для различных значений параметров. Чем больше значение параметра (показаны на графике), тем дальше точки находятся от линии нуля. Слева показаны результаты при различных значениях параметра мертвой зоны, с ростом значения параметра уменьшается число кадров, отнесенное к повороту.

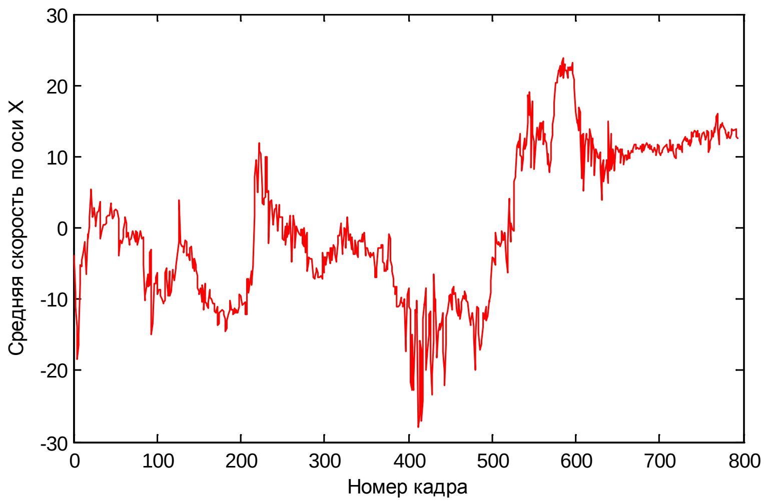


Рис. 2. График средней скорости

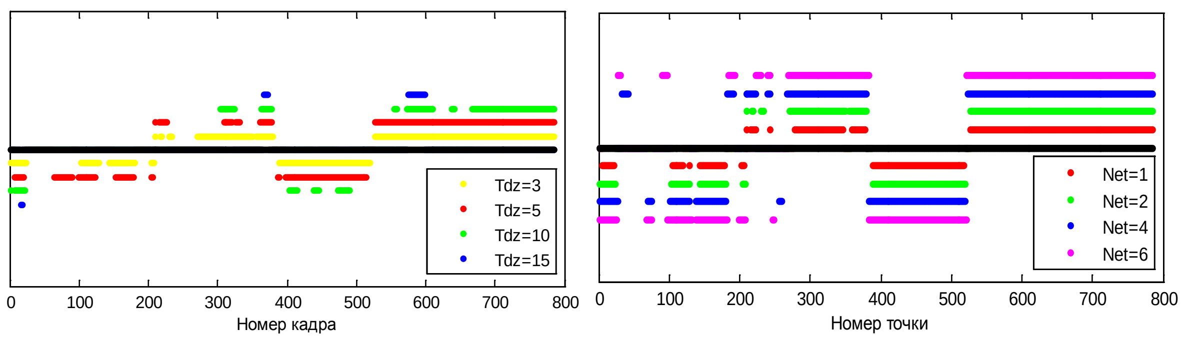


Рис. 3. Результаты определения режима движения

Увеличение числа допустимых выбросов при фиксированном значении числа кадров для определения поворота вызывает увеличение числа выбросов при определении поворота (выбросы в верхних двух линиях). Кроме того, с увеличением числа кадров, по которым принимается решение, уменьшается число разрывов при определении поворота.

Заключение

В работе рассмотрен метод для детектирования поворота транспортного средства по видеопоследовательности с камеры, направленной по ходу движения. Для получения информации о характере движения использован метод оптического потока, представленный двумя функциями из библиотеки компьютерного зрения OpenCV. Разработана методика обработки данных, возвращаемых оптическим потоком, для сохранения информации о движении особых точек. Разработан алгоритм, принимающий решение о режиме движения на основе этой информации.

1 Nghiem, A.-T. Background subtraction in people detection framework for RGB-D cameras / A.-T. Nghiem, F. Bremond // 11th IEEE International Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance (AVSS). – 2014. – pp. 241-246.
2 Martinello, M. Depth estimation from a video sequence with moving and deformable objects / M. Martinello, P. Favalo // IET conference on Image Processing. – 2012. – pp. 1-6.
3 Wang, J. Moving Camera Moving Object Segmentation in Compressed Video Sequences/J. Wang, N.V. Patel, W.I.Grosky, F.Fotouhi//International Journal of Image and Graphics. – vol. 9. – № 4. – 2009. – pp. 609-627.
4 Caraffi, C. A System for Real-time Detection and Tracking of Vehicles from a Single Car-mounted Camera / C. Caraffi, T. Vojir, J. Trefny, J. Sochman, J.
5 Jianbo, S. Good Features to Track/S. Jianbo, C. Tomasi // Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – 1994. – pp. 593-600.
6 Lukas, B. An Iterative Image Registration Technique with an Application to Stereo Vision/B. D. Lukas, T. Kanade // Proceedings of the 7th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI '81). – 1983. – pp. 674-679.
7 Thakoor, N. Automatic video object shape extraction and its classification with camera in motion / N. Thakoor, J. Gao//Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing. – vol. 3. – 2005. – pp. 437-440.
8 Zhang, Y. Robust Moving Object Detection at Distance in the Visible Spectrum and Beyond Using a A Moving Camera / Y. Zhang, S.J. Kiselewich, W.A. Bauson, R. Hammoud // Proceedings of Conference on Compter Vision and Pattern Recognition Workshop. – 2006. – pp. 131.
9 T. Yakamoto, F. Tonokawa, Y. Yamashita. Support System to inform Driver of Approaching Objects // Fujitsu Ten Technical Journal. – №39. – 2013. – pp. 3-8.

V. Tseluyko, A. Bakhshiev

LOW-RESOLUTION OBJECT RECOGNITION IN THE INTELLIGENT VIDEO ANALYSIS SYSTEMS BY DEEP LEARNING METHODS

RTC, Saint-Petersburg, Russia
v.celuyko@rtc.ru, alexab@rtc.ru

В.В. Целуйко, А.В. Бахшиев

РАСПОЗНАВАНИЕ ОБЪЕКТОВ НИЗКОГО РАЗРЕШЕНИЯ В СИСТЕМАХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ВИДЕОАНАЛИЗА МЕТОДАМИ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ

ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург
v.celuyko@rtc.ru, alexab@rtc.ru

Введение

В современном анализе данных большое внимание уделяется алгоритмам распознавания образов. В связи с постоянно увеличивающимися техническими возможностями, данные алгоритмы наиболее часто применяются для распознавания объектов с высоким разрешением. Так в базе данных проекта ImageNet [1], изображения в среднем имеют разрешение 500x300 пикселей. В соревнованиях по распознаванию образов данной базы данных лучшие результаты показывают алгоритмы с использованием глубоких нейронных сетей.

Однако, в системах интеллектуального анализа видео, детектируемые объекты имеют низкое разрешение, в среднем 20x20 пикселей. В данной статье приводятся результаты исследований алгоритмов глубокого обучения нейронных сетей, для распознавания объектов с низким разрешением. В исследованиях использовался набор инструментов для среды Matlab «DeepLearnToolbox», предложенный в свободном доступе Р. Б. Палмом [2], применялись модели глубоких сетей доверия (DeepBeliefNeuralNetwork) и свёрточных сетей (ConvolutionNeuralNetwork).

1 Глубокое обучение

Глубокое обучение (DeepLearning) является подразделом машинного обучения и имеет такое название в связи с тем, что оно направлено на обучение нейронных сетей с глубокой архитектурой, т.е. с более чем одним скрытым слоем.

Впервые, в 1989 году глубокую нейронную сеть удалось обучить с помощью алгоритма обратного распространения ошибки Яну Ле Куну [3], но в связи с тем, что для обучения сети требовались большие вычислительные способности (сеть обучалась три дня), данный метод не получил большой популярности.

В 2006 году, профессор ДжофриХинтон предложил быстрый алгоритм послойного обучения глубокой нейронной сети с помощью ограниченных машин Больцмана и последующим дообучением с помощью алгоритма обратного распространения ошибки [4]. Это послужило толчком для дальнейшего развития исследований в области глубокого обучения.

Вследствие роста вычислительных способностей, в последнее время широкое распространение в распознавании изображений получили нейронные сети со свёрточной архитектурой. На данный момент они занимают лидирующее положение в решениях данной задачи. Победителем конкурса от ImageNet 2014 года стала нейронная сеть со свёрточной архитектурой, которая имеет 19 скрытых слоёв [5].

2 Глубокие сети доверия

Глубокие сети доверия относятся к каскадным автоассоциативным сетям. Их главное отличие заключается в использовании ограниченных машин Больцмана во время предварительного обучения на неразмеченных данных.

В модели ограниченной машины Больцмана существуют связи только между видимым слоем и скрытым, но нет связей внутри слоёв, в отличие от обычной машины Больцмана, как показано на Рис. 1.

Ограниченная машина Больцмана, далее просто машина, обучается по алгоритму сравнительного расхождения предложенному Джофри Хинтоном [4].

При обучении первой машины видимым слоем является исходное изображение, при обучении последующих машин, в качестве видимого слоя выступает скрытый слой предыдущей машины. После обучения всех машин, все скрытые слои объединяются в сеть прямого распространения, которую продолжают обучать по размеченным данным с помощью алгоритма обратного распространения ошибки.

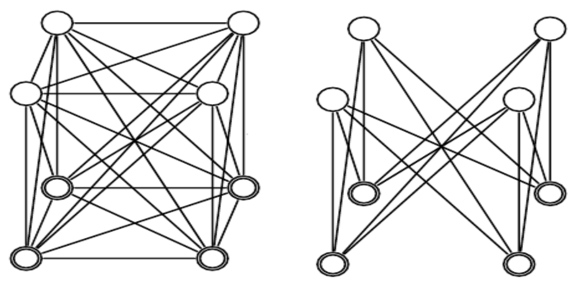


Рис.1. Слева: машина Больцмана, справа: ограниченная машина Больцмана

3 Свёрточные сети

Архитектура свёрточных сетей значительно отличается от полносвязных сетей прямого распространения. В качестве нейронов скрытых слоёв сети используются массивы нейронов, так называемые карты признаков. В архитектуре свёрточных сетей чередуются два типа слоёв: свёрточные и слои подвыборки. В свёрточных слоях происходит выделение признаков, построение карт признаков. Слои подвыборки служат для уменьшения размерности карт признаков

Для всех нейронов каждой конкретной карты признаков имеется один настраиваемый вес, таким образом, настраиваемых весов сверточных сетей на порядки меньше, чем у полно-связных сетей прямого распространения. В связи с меньшим количеством настраиваемых весов, для обучения свёрточных нейронных сетей часто применяется алгоритм обратного распространения ошибки.

Ещё одним преимуществом сверточных сетей является сохранение геометрии изображения. При работе с полносвязными сетями прямого распространения, изображение раскладывается в вектор, таким образом, теряется вся информация о геометрии. При использовании свёрточных сетей при операции свёртки, ядро свёртки «скользит» по всему изображению, тем самым сохраняет информацию о геометрических особенностях изображения. Другими словами, во время проведения операции свёртки происходит поиск того или иного геометрического признака.

Недостаток свёрточной архитектуры нейронной сети в том, что она становится пригодной, в основном, только для распознавания изображений.

Пример архитектуры свёрточной сети приведён на Рис. 2.

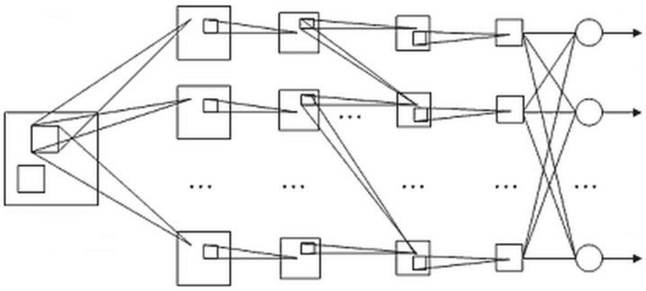


Рис.2. Пример архитектуры сверточной сети

4 Постановка задачи

Система видеоаналитики срабатывает при обнаружении движущегося объекта и выдаёт фрагмент изображения для классификатора. Задача – определить, является ли объект, разрешённым для нахождения на территории. К неразрешённым относятся люди и средства передвижения, к разрешенным – собаки и прочие ложные срабатывания. Примеры выдаваемых на классификацию изображений приведены на Рис. 3.

Из примеров видны основные проблемы, влияющие на возможность распознавания объектов, а именно: низкое разрешение, низкая контрастность, часто на изображении имеется только часть объекта.

5 Результаты исследований

Обучающая выборка состояла из 1640 элементов, из них 400 изображений машин, 500 изображений людей и 740 прочих изображений, полученных в результате работы системы видеоаналитики. Тестовая выборка состояла из 192 элементов: 51 машина, 86 людей, 55 прочих изображений.

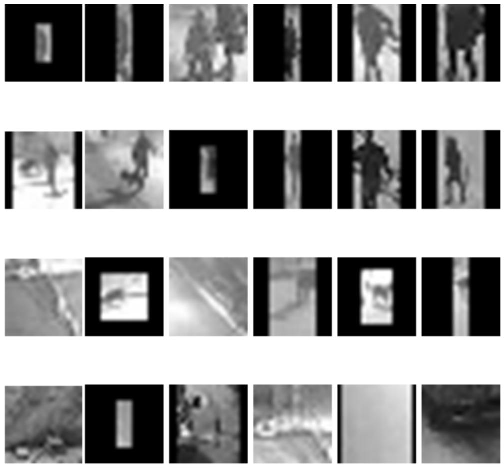


Рис.3. Примеры классифицируемых изображений

При исследовании глубоких сетей доверия были выбраны три архитектуры сети: два скрытых слоя по 100 нейронов в каждом слое, далее [100 100], три скрытых слоя по 100 нейронов в каждом слое, далее [100 100 100], два скрытых слоя по 500 нейронов в каждом слое, далее [500 500].

Все три сети показали приблизительно одинаковые результаты, представленные на рисунке 4. Здесь и далее ошибка находится в интервале от 0 до 1, где 1 – 100% случаев, 0 - 0% соответственно. Отсюда следует, что для решения данной задачи с помощью глубоких сетей доверия, не имеет смысла увеличение числа скрытых слоев и числа нейронов внутри слоев.

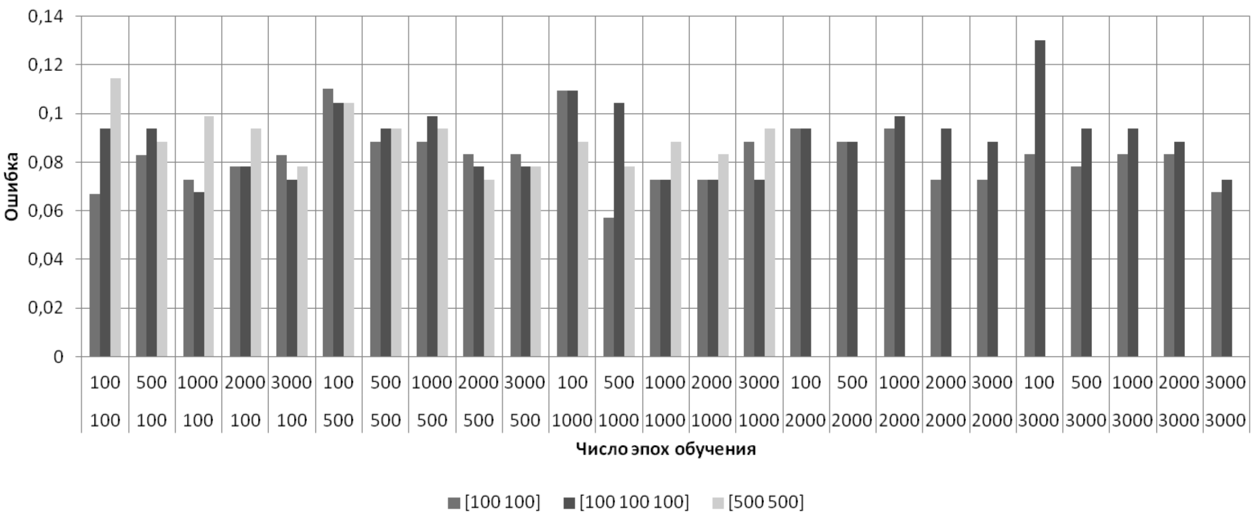


Рис.4. Графики зависимости ошибки распознавания тестовой выборки от числа эпох обучения глубокой сети доверия

Нижнее число на оси абсцисс означает число эпох предобучения ограниченных машин Больцмана, верхнее – последующего обучения методом обратного распространения ошибки

Дополнительно были проведены испытания сетей с такими же архитектурами для распознавания рукописных чисел из базы данных MNIST [6]. Лучший результат показала сеть с архитектурой [500 500], при 1000 эпохах предобучения и 3000 эпохах последующего обучения ошибка распознавания тестовой выборки составила 0,008. Из сравнения результатов следует, что классы в поставленной задаче имеют более низкую линейную разделимость.

При исследовании сверточных нейронных сетей были выбраны две архитектуры. Первая: сверточный слой с 6-ю картами признаков, слой подвыборки, сверточный слой с 12-ю картами признаков, слой подвыборки, далее [6 s 12 s]. И вторая: сверточный слой с 12-ю картами признаков, слой подвыборки, сверточный слой с 24-мя картами признаков, слой подвыборки, далее [12 s 24 s].

Из результатов, представленных в Таблице 1, следует, как и в предыдущем случае, отсутствие необходимости увеличения числа нейронов. В сравнении с глубокими сетями доверия результат в среднем лучше на 2%.

Также были проведены испытания с этими архитектурами для распознавания чисел. Лучший результат показала сеть с архитектурой [6 s 12 s]. За 1000 эпох обучения ошибка составила 0,009.

Таблица 1

Результаты работы сверточных сетей

Число эпох обучения	Ошибка распознавания тестовой выборки сети [6 s 12 s]	Ошибка распознавания тестовой выборки сети [12 s 24 s]
50	0,192	0,125
100	0,094	0,146
250	0,088	0,099
500	0,057	0,067
1000	0,052	0,070
2000	0,052	0,067

Заключение

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод о возможности использования алгоритмов глубокого обучения для распознавания объектов низкого разрешения.

В контексте данной задачи, улучшение результата возможно с использованием накопления статистики распознавания за несколько последовательных обнаружений одного и того же объекта.

Для получения более точных зависимостей результатов от архитектуры сетей, необходимо иметь значительно более многочисленную тестовую выборку.

1. Prof. Li Fei-Fei, Prof. Kai Li, Olga Russakovsky, Jonathan Krause, Prof. Jia Deng, Prof. Alex Berg. Главная страница проекта ImageNet. *ImageNet.* [В Интернете] 2014 г. [Цитировано: 22 03 2015 г.] http://image-net.org/.
2. Palm, Rasmus Berg. rasmusbergpalm/DeepLearnToolbox. *GitHub.* [В Интернете] 04 2014 г. [Цитировано: 22 03 2015 г.] https://github.com/rasmusbergpalm/DeepLearnToolbox.
3. Y. LeCun, B. Boser, J.S. Denker, D. Henderson, R.E. Howard, W. Hubbard, L.D. Jackel. Backpropagation Applied to Handwritten Zip Code Recognition. *Neural Computation.* 1989 г.
4. Geoffrey E. Hinton, Simon Osindero. A fast learning algorithm for deep belief nets. *Neural Computation.* 2006 г.
5. Very Deep Convolutional Networks for Large-Scale Image Recognition.Karen Simonyan, Andrew Zisserman. 2015.
6. LeCun, Y. THE MNIST DATABASE of handwritten digits. *Веб узел Яна Ле Куна.* [В Интернете] Y. LeCun. http://yann.lecun.com/exdb/mnist/.

A.I. Timofeev

TECHNICAL THINKING SYSTEMS AND MANIPULATION ROBOTICS

National Institute of Aviation Technologies, Moscow, Russia
timofiev@yandex.ru

The last years much attention is paid to Systems Thinking including international special conferences [1] which presented innovative papers on the theory and it's application – Technical Thinking Systems including also a variety of “smart” systems, for example, "smart " cities of future, “smart” homes, “smart” streets and “smart” apartments, “smart” eyes, and “intelligent” hands and so on, discussed the roles of these systems in natural and extreme conditions, computer science, pedagogy, the specific requirements for citizents of future smart cities, the problems of variety of simulations of Systems Thinking

Academician A.N. Kolmogorov considered [2] that *simulation of methods of organization* (as a set of information processes or actions, coming to expected results) *of material systems* (including biological) *is to use other material elements* (and useful algorithms of functioning and elements of structures) *to create new systems with essentially the same organization* (and their methods) like the original system. *Therefore*, to his opinion, *the quite complete model of a living system should be called as a living system, and the quite complete model of a thinking system should be called* as a *thinking system.*

In general it is known that any smart system can use *the principle of selection (by adopted criteria) the solution or need algorithm of limited actions from previously performed their list.*

Decision taking procedure of *Thinking Systems* are implemented by another way. First of all, some psychologists have considered that usually any normal man try to get ahead the semantics of his future actions (with expected the results) before realization of these actions, otherwise his life will be meaningless.

Therefore *Thinking Systems* as the original systems of simulation of human informational processes of decision taking, cannot contain ahead the list of solutions with specific limited algorithms of actions, for example, in natural indeterminate environment and so include the following features at autonomous level:

– determination of environment (situation) with it’s simulation at semantic level,
– cognitive analysis of received information model of environment,
– estimation of received informational model by comparison with the model of expected purpose at parametric level,
– prognosis the results of virtual actions of taken solutions with possible application of self-organization processes,
– generation of adequate solutions and specific algorithms of actions.

So the ability of Thinking Systems *to identify and represent the semantics of external environment adequately to semantics of solving tasks at parametric levels autonomously is a direct step from primitive level of thinking to professional level of thinking of Technical intellectual Systems.*

For example, the long absence of decision of one of actual unsolved problems of manipulation robotics and prosthetic devices – *capture reliability of non - oriented complex shape objects* – as the necessary stage of any object's manipulation in natural indeterminate surroundings *has a negative impact* on the expansion of using of manipulation robotics and prosthesis in Economy, Medicine, natural and extreme conditions for living.

The main reason for existence of this problem *is connected with the absence of active force projections of weight of any object* in the new multitude of contact points (at the stage before object’s separation from the initial position), and obligatory *appearance of these active forces later as well as appearance of other passive* *forces* in these contact points during at the stage of object's manipulation due to objective physical laws on our planet.

This generates paradoxical situation when at first it is necessary to take decision (by any man or robot) on capture reliability in initial conditions (before separation of object) but then the realization of that decision takes place in another conditions

So the physical situations in the system of K-On can take different uncontrolled state force and moment equilibrium (stable , unstable, etc.) because of lack of information support.

If adaptation to unknown complex forms (topological task) can be achieved by application any vision system and adaptive robotic gripper, now the problem of capture reliability (physical task) for mentioned reasons has not comprehensive solution in the World.

Therefore *manipulation possibilities of any robot connected with capture of object can be realized successfully only in the shot frames of beforehand created or estimated by man determinate conditions.*

This also deprives robotics the possibility of any autonomy in different natural situations.

At the present the condition of successful introduction of manipulation robotics in industry is the application of the principle "Forced ordered surroundings" in the form of using of the accessories of orientation, storage and timely delivery of each object in the capture position.

If it is necessary to chance the articles of objects at that case the accessories and grippers of robotics can be the subjects for repair or compensation.

In extreme conditions (space, nuclear industry, oceans, dangerous situations, etc) the operators of manipulators with manual control, deprived of the possibility of using their own biological function of capture (including the spatial sense of touch hand) and so are forced to take decision on capture any object (as the physical task) by using their own view or limited information of force-sensed manipulators.

As a result of the application of principles and methods of Technical-Thinking Systems in manipulation robotics there is a real possibility of a large-scale invasion of manipulation robotics in an unknown and inaccessible earlier sphere of human activities as direct executers for manual and mechanized operations in domestic sphere, industry, agriculture, etc.

For example, the technical solution [3] of mentioned Problem is based on simulation the only cardinal solution implemented by the Nature on human hand, and is associated with the use of purposefully formalized interdisciplinary knowledge and results of the experiment of revelation of functional principles of motor activity of human hands [6].

This solution contains the determination of physical situations in the system " Brush object" with their simulation and cognitive analysis, as well as the geometrization of physical situations, with translation of original information from its "closed" status in "open" status for our consciousness.

Quantitative and qualitative *assessments* of physical situations with prognosis of reliability of capture are the basis for making appropriate adequate solutions on capture reliability of non-oriented objects (before its separation from the initial position).

The use of internal image language (based on the semiotic structure of relations of contact points) for the purpose of intellectualization of information processes (receiving, processing, storage and transmission of information) in the "Brush Object" provides semantic expressiveness as these processes and so parameters of taken decisions with the ability to ensure their *endo-physical* properties..

Achieved *the analogy* of the structure of the "inner word" of internal image language with the structure of the "inner word" of human language *is the basis of identity* (towards biological prototype) of accepted *method of organization of information processes as determination* of physical situations in the system "Brush object" and *prognosis* capture reliability of non-oriented objects with *estimations* of physical situations, *decision taking* and the ability *to control physical situations* (in case of negative results of prognosis).

Mentioned represents *the essence of technical functional analogues* of human information processes in natural uncertain environment during the performing the same tasks.

Above can stimulate as a promising large-scale replacement of working persons by future manipulation robotics in natural non-determinate environments, and so the improvement of robotics in the field of intellectualization, which in turn generates the analogy with the active role of a human hand in the material and spiritual spheres of its labour sphere as the steps in the evolutionary processes of our Civilization and of Humanity itself.

1. A.I.Timofeev, V.A. Dmitrieva. The system of decision taking in indeterminate situations. B.S. Laboratory – 2nd International Symposium " Systems Thinking for a Systainable Economy", Universitas Mercatorum, Rome, Italy. 23-24 January, 2014
2. Колгоморов А.Н. Жизнь и мышление как особые формы существования материи. Из сборника "О сущности жизни", М, Наука, 1964, с.52.

3. Тимофеев А.И. Семиотическая основа процессов прогнозирования в неопределенных условиях. Материалы Десятой национальной конференции по искусственному интеллекту. 25-28 сент. Обнинск. Физматлит.2006.
4. A.Timofeev. Artificial intellectual hand: Capture reliability prognosis of non-oriented complex shape objects for manipulating robotics. EMCSR 2012 - European Meeting on Cybernetics and Systems Research, University of Vienna, Austria, 10-13 of April, 2012.
5. A.Timofeef, V.Dmitrieva. Civilization and technological thinking systems. 9Th Congress of the UES-EUS. Globalization and Crisis. Complexity and Govermance of systems. Universitat Valencia, Spain, 15-16 October, 2014.
6. Anatoly Timofeev. Civilization and Technical Thinking Systems. ISBN 978-3-659-67185-2, LAMBERT Academic Publishing, Germany, 42p., 2015.

А.И. Тимофеев

ТЕХНИЧЕСКИЕ МЫСЛЯЩИЕ СИСТЕМЫ И МАНИПУЛЯЦИОННАЯ РОБОТОТЕХНИКА

ОАО «Национальный институт авиационных технологий», Москва
timofiev@yandex.ru

В последние годы за рубежом большое внимание уделяется *Мыслящим Системам,* в т.ч. проводятся специализированные международные конференции [1], где представлены инновационные доклады по разнообразным “*умным*” (smart) и *мыслящим* (thinking) системам, включая такие как, например, “умные” города будущего с “умными” домами, “умными” улицами и “умными” квартирами, “умными” глазами, “умными” руками и т.д., обсуждается роль этих систем в педагогике, в бытовых и экстремальных условиях, рассматриваются конкретные требования, которым должны отвечать жители городов будущего.

Академик А.Н. Колмогоров полагает [2], что *моделирование способов организаций* материальных систем (в т.ч. и биологических) *заключается в создании из других материальных элементов* (и алгоритмов функционирования) *новых систем*, *обладающих в существенных чертах той же организацией, что и моделируемая система*. Поэтому *достаточно полная модель (*на разных уровнях*) живого существа должна называться живым существом, а модель мыслящего существа – мыслящим существом.*

В целом известно, что любая "умная" система способна применять *принцип выбора (методом перебора по заранее принятым критериям) решения и (или) алгоритма действий из предварительно составленного (человеком) ограниченного списка.*

Процедура принятия решения в *Мыслительных Системах* происходит иначе.

Прежде всего некоторые психологи полагают, что обычно любой нормальный человек стремиться определить *семантику* (смысловой компонент) будущих действий, иначе жизнь его может оказаться бессмысленной.

Поэтому *Мыслительные Системы как* специальные системы моделирования процессов принятия решений в различных ситуациях, в т. ч. неопределенных исходных условиях, не предназначены для использования упомянутые ограниченные списки решений или их алгоритмов, а содержат следующие функциональные особенности, реализуемые в автономном режиме:

– детерминирование внешней среды с ее моделированием на семантическом уровне,
– проведение когнитивного анализа полученной информационной модели,
– оценка этой модели через сравнение с моделью ожидаемых результатов решаемых задач на параметрическом уровне, поставленных человеком,
– прогнозирование результатов виртуальных действий принимаемых решений с применением, при необходимости, процессов самоорганизации (при отрицательных результатах прогноза),
– генерация адекватных решений и специальных алгоритмов действий.

Способность Мыслительных Систем автономно детерминировать и представлять на параметрическом уровне семантику внешней среды адекватно семантике решаемых сложных задач представляет собой прямой шаг от примитивных уровней мышления к профессиональному уровню мышления.

Например, длительное отсутствие решения одной из актуальных и нерешенных проблем в манипуляционной робототехнике и протезостроении — *Обеспечение надежности захвата неориентированных объектов сложных форм* - как необходимой стадии любых манипуляций с объектами в естественных неопределенных условиях оказывает негативное воздействие на широкомасштабное применение роботов в Экономике, Медицине, в естественных и экстремальных условиях жизнедеятельности человека.

Основная причина существования этой проблемы связана с условиями *отсутствия активных проекций силы веса (как векторные величины) любого объекта во множестве новых точек контакта (до отрыва объекта от исходной позиции), и обязательного появления этих активных сил, и других пассивных сил в этих точках позднее, в процессе манипулирования объектом* в соответствии с объективными законами физики на нашей планете.

Это генерирует парадоксальную ситуацию, когда необходимо принимать решение (роботом или человеком) о захвате объекта в исходных физических условиях, а реализация этого решения будет происходить в других физических условиях (после отрыва объекта от исходного положения). Поэтому в системе "Кисть-объект "физическая ситуация может принимать различные неконтролируемые состояния равновесия разных сил и моментов (устойчивые, неустойчивые и т. д.) по причине недостатка информационного обеспечения манипуляционных роботов в области реальных физических состояний в системе "Кисть-объект ".

Если адаптацию робота к неизвестным формам и положениям неориентированных объектов (топологическая задача) возможно достигнуть применением систем технического зрения и адаптивных захватных устройств, то управление процессами достижения надежности захвата (как физическая задача) по указанной выше причине не имеет кардинального решения на мировой арене в настоящее время.

Поэтому и сегодня манипуляционные возможности любого робота, связанные с захватом неориентированных объектов сложных форм, могут быть успешно реализованы исключительно в пределах узких границ детерминированной среды, заранее созданной или осознанной человеком

Это также лишает роботов автономности в различных естественных условиях.

В настоящее время условием успешного применения манипуляционных роботов в промышленности является применение принципа " Принудительного упорядочения внешней среды " в виде применения разнообразной оснастки по ориентированию, накоплению и своевременной выдачи каждого объекта в позицию захвата роботом.

В случае необходимости изменить номенклатуру объектов (в т.ч. с иными их формами и размерами) для роботизации изготовления, вся указанная оснастка подлежит переналадке или замене.

В экстремальных условиях (космос, ядерная энергетика, глубины океана и т.д.) операторы манипуляторов с ручным управлением, лишенные возможности применения собственной биологической функциональной системы — системы захвата (включая тактильное очувствление и его стадии), вынуждены принимать решения по надежности захвата неориентированного объекта (физическая задача) исключительно посредством применением собственного зрения или крайне ограниченного силового очувствления манипуляторов

В результате применения принципов и методологии *Технических Мыслящих Систем* в *манипуляционной робототехнике* появляется реальная возможность широкомасштабного вторжения робототехники в незнакомую и недоступную ранее сферу трудовой деятельности человека в качестве непосредственных исполнителей применяемых сегодня ручных и механизированных работ в бытовой сфере, промышленности, сельском хозяйстве и т.д.

Основная причина - их способность *детерминировать* физические ситуации в системе "Кисть–Объект" и *прогнозировать надежность* захвата неориентированных объектов сложных форм в исходной позиции на автономном уровне, аналогично постоянной, вынужденной и бессознательной деятельности человека.

Техническое решение упомянутой нерешенной проблемы основано, например, на моделировании единственного кардинального решения [3], реализованного Природой на руке человека, и связано с применением целенаправленно формализованных междисциплинарных знаний и результатов эксперимента по выявлению функциональных принципов двигательного акта руки человека в аналогичных условиях [6].

Это решение содержит *детерминирование* физических ситуаций в системе " Кисть-объект" с их *моделированием и когнитивным анализом,* а также *геометризацию этих ситуаций,* что обеспечивает возможность перевода исходной информации из "закрытого" статуса для нашего сознания в "открытый" статус.

Последующие количественные и качественные *оценки* упомянутых физических ситуаций с *прогнозированием надежности* захвата (как устойчивого состояния равновесия всех сил и моментов в системе " Кисть-объект") являются базисом для принятия *адекватного решения* о захвате неориентированных объектов (до отрыва объекта от исходной позиции).

Применение внутреннего образного языка (на основе семиотической структуры отношений точек контакта) с целью *интеллектуализации* многоуровневых информационных процессов (по приему, обработке, хранению и передаче информации) в системе “Кисть-Объект” обеспечивает *семантическую выразительность* как этих процессов, так и параметров принятых решений с возможностью обеспечения их *эндофизическими* свойствами.

Достигнутая *аналогия* структуры “внутреннего слова” этого образного языка со структурой “внутреннего слова” языка человека является основанием *идентичности биологическому прототипу (на данном уровне) принятого способа организации информационных процессов как детерминирования* физических ситуаций в системе “ Кисть-объект”*, так и прогнозирования* надежности захвата неориентированных объектов *с оценками физических ситуаций, принятием решений и* возможностью управления физическими ситуациями (при отрицательных результатах прогнозирования).

Упомянутое представляет собой сущность специфических *технических функциональных аналогов* на данном уровне информационных процессов человека, происходящих в естественной неопределенной среде при выполнении аналогичных задач.

Это стимулирует как перспективные масштабные замещения работающего человека будущей манипуляционной робототехникой в естественных недетерминированных средах, в том числе в экстремальных средах, так и совершенствование самой робототехники, прежде всего, в области ее интеллектуализации, что, в свою очередь, генерирует аналогию с активной ролью руки человека в материальной и духовной сферах его обитания как шагов на пути эволюционных процессов нашей Цивилизации и самого Человечества.

1. A.I.Timofeev, V.A. Dmitrieva. The system of decision taking in indeterminate situations. B.S. Laboratory – 2nd International Symposium “ Systems Thinking for a Systainable Economy”, Universitas Mercatorum, Rome, Italy. 23-24 January, 2014
2. Колгоморов А.Н. Жизнь и мышление как особые формы существования материи. Из сборника “О сущности жизни”, М, Наука, 1964, с.52.
3. Тимофеев А.И. Семиотическая основа процессов прогнозирования в неопределенных условиях. Материалы Десятой национальной конференции по искусственному интеллекту. 25-28 сент. Обнинск. Физматлит.2006.
4. A.Timofeev. Artificial intellectual hand: Capture reliability prognosis of non-oriented complex shape objects for manipulating robotics. EMCSR 2012 - European Meeting on Cybernetics and Systems Research, University of Vienna, Austria, 10-13 of April, 2012.
5. A.Timofeef, V.Dmitrieva. Civilization and technological thinking systems. 9Th Congress of the UES-EUS. Globalization and Crisis. Complexity and Govermance of systems. Universitat Valencia, Spain, 15-16 October, 2014.
6. Anatoly Timofeev. Civilization and Technical Thinking Systems. ISBN 978-3-659-67185-2, LAMBERT Academic Publishing, Germany, 42p., 2015

A. Pryadko, A. Rachitsky, O. Shmakov, A. Rogov

THE ANALYSIS OF DESIGN METHODS FOR SMALL JUMPING ROBOTS

RTC, Saint-Petersburg, Russia
shmakov@rtc.ru, rogov@rtc.ru

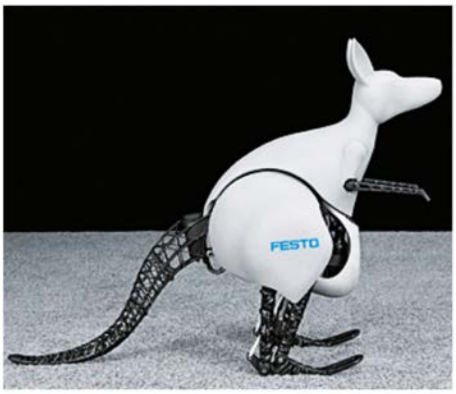
А.И. Прядко, А.В. Рачицкий, О.А. Шмаков, А.В. Рогов

АНАЛИЗ ПРИНЦИПОВ ПОСТРОЕНИЯ ПРЫГАЮЩИХ МАЛОГАБАРИТНЫХ РОБОТОВ

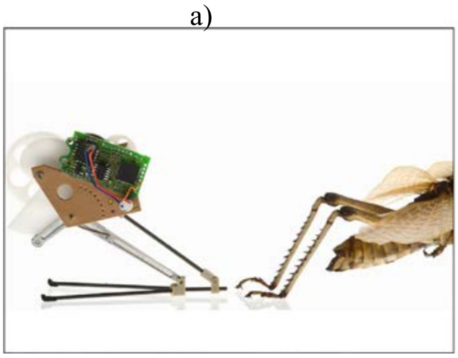
ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург
shmakov@rtc.ru, rogov@rtc.ru

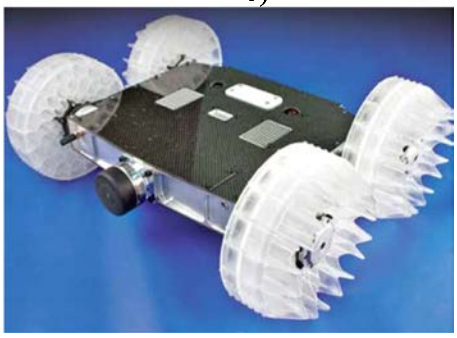
В настоящее время ведутся исследования в области создания малогабаритных роботов, реализующих принцип прыгающей локомоции как единственный способ перемещения робота, так и комбинированным, при котором способность совершать прыжки расширяют функциональные возможности колесных или гусеничных платформ.

Типичными представителями первого направления могут служить роботы BionicKangaroo, Grasshopper и Z-Hopper (рисунок 1 а, б, в), а второго направления – Sand Flea. (рисунок 1 г).



а) б)





в) г)

Рис. 1. Малогабаритные роботы, реализующие принцип прыгающей локомоции

Способы реализации прыгающей локомоции повторяют принципы, заимствованные у живой природы, которые можно характеризовать как «способ кузнечика» (рисунок 1 в), заключающийся в последовательном аккумулировании энергии, а затем ее высвобождение, и «способ кенгуру» (рисунок 1 а, б), когда животное перемещается последовательными сериями прыжков с использованием механизма рекуперации, когда энергия предыдущего прыжка частично преобразуется для совершения следующего. В роботах второго типа предусмотрены элементы, играющие роль искусственных сухожилий. В процессе прыжка эти сухожилия, сделанные, например, из резины, играют роль амортизатора и аккумулируют часть кинетической энергии предыдущего прыжка, переводя ее в потенциальную энергию упругих сухожилий, которая вновь используется для следующего прыжка.

Надо отметить, что скорость движения прыжками способом кенгуру больше, при этом затраты энергии на следующий прыжок тратится меньше чем при реализации прыжка по «способу кузнечика». С точки зрения технической реализации такие прыжки требуют дополнительных механизмов, обеспечивающих ориентацию положения робота в полете для контролируемого приземления, для чего у кенгуру развит массивный и подвижный хвост.

Рис. 2. Покадровое перемещение робота

Проведенный анализ вариантов показал, что с точки зрения создания малогабаритных роботов рациональным является вариант синергии локомоций (рисунок 2), при которой перемещение по «удобным» поверхностям осуществляется с помощью традиционных способов, а преодоление препятствий выполняется с помощью прыжков. Элемент, отвечающий за прыжок – воздушный или электропружинный механизм, за перемещение – колесная или гусеничная платформа.

A. Pryadko, A. Rachitsky, O. Shmakov, A. Rogov

INFLUENCES OF SERVICE CONDITIONS ON THE CHOICE OF DESIGN SCHEME FOR SMALL JUMPING ROBOT

RTC, Saint-Petersburg, Russia
shmakov@rtc.ru, rogov@rtc.ru

А.И. Прядко, А.В. Рачицкий, О.А. Шмаков, А.В. Рогов

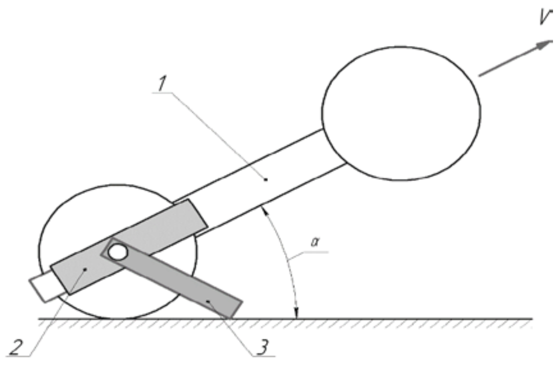
ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ НА ВЫБОР КОНСТРУКТИВНОЙ СХЕМЫ ПРЫГАЮЩЕГО МАЛОГАБАРИТНОГО РОБОТА

ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург
shmakov@rtc.ru, rogov@rtc.ru

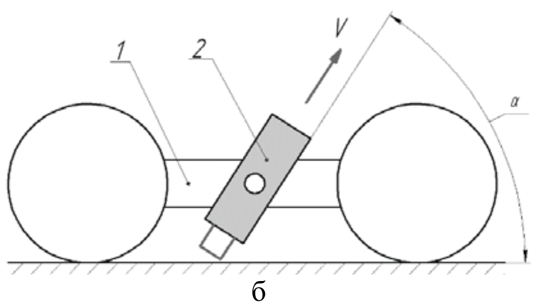
Целью работы является создание малогабаритного мобильного робота, способного преодолевать препятствия типа рва, уступов, кратно превышающих размеры робота. Для придания таких функциональных возможностей робот проектируется по принципу комбинированной локомоции, для реализации которого он должен быть оснащен, в дополнении к базовым средствам мобильности для перемещения по поверхностям с неровностями, соизмеримыми с клиренсом устройства, еще и специальными средствами для выполнения прыжка под заданным углом и с требуемым вектором начальной скорости, которые однозначно определяют параметры прыжка. При этом данный модуль должен осуществлять ориентацию платформы корпуса робота и выполнять собственно прыжок.

Входными условиями для проектирования являются: масса робота – не более 5 кг, высота преодолеваемых препятствий 0,5 - 3 м, возможное количество прыжков при выполнении миссии – не менее 5, время автономной работы не менее 1 ч.

Возможные варианты способов и конструктивные схемы модуля управления направлением вектора скорости прыжка показаны на рисунке 1, где 1 –мобильный робот, 2 – прыжковый механизм, 3 – механизм поворота (на рисунке 1 б находится внутри корпуса), V –вектор скорости, α – угол направления прыжка.



а



б

Рис. 1. Схемы управления направлением вектора скорости прыжка

Выбор варианта реализации прыжкового модуля зависит от комплекса исходных технических требований.

Так, например, использование электромеханического механизма не требует второго источника энергии, в отличие от пневматического, для которого необходим баллон с газом. Но на взвод пружины робот должен быть оснащен приводом, способным развивать достаточно большие усилия на что тратится большой расход электрической энергии аккумуляторов робота, в отличие от пневматического. При этом надо иметь ввиду, что при увеличении желаемого количества прыжков, необходимо увеличивать количество газа, что приведет к росту массы, падении скорости и проходимой способности робота.

Поэтому для выбора варианта необходимо проработать обе схемы и сравнить их соответствие требованиям.

I. Dalyaev, I. Shardyko, E. Kuznetcova

TECHNICAL APPEARANCE OF MEANS OF ROBOTIC SUPPORT OF SERVICE SATELLITE DESIGNED TO PROLONG ACTIVE LIFETIME OF SPACEVEHICLES*

RTC, Saint-Petersburg, Russia
igor@rtc.ru,i.shardyko@rtc.ru, e.kuznecova@rtc.ru

Development, manufacturing and launching of space vehicles has a high cost, so nowadays there is an urgent need of extension of their active lifetime. International experience analysis shows that the most valuable and unique objects, such as "Hubble" space telescope, have been repeatedly maintained and repaired in outer space by astronauts. It should be noted that such expeditions entail certain risk to the life of manned space vehicle crews and have an extremely high cost. It is obvious that such operations should be preferably carried out by service spacecraft equipped with means of robotic support (MRS).

In recent years, world powers lead the development aimed at creating service spacecrafts, by means of which it will be possible to carry out orbital maintenance operations on functioning space vehicles. When creating service satellite much attention is devoted to such tasks as inspection [1, 2, 3], transportation [4], motion control, refueling, maintenance and repair work, carrying out orbital assembly.

In 2007, the space experiment was conducted under Orbital Express program [5], which aims to develop autonomous technology of refueling and reconfiguration of satellites directly in orbit. The experiment simulated a rendezvous of two launched satellites – ASTRO to NextSat–in automatic mode with the flyby maneuvers in close proximity (approximately 60 m), a soft grip, docking, fuel transfer, transfer of batteries and computers, bringing them into operation, undocking of space vehicles.

Now under the direction of DARPA there is continuing work within FREND program [6] pursuing the creation of multi-service satellites, equipped with a robotic system of three manipulators, allowing to dock with an arbitrary satellite with no docking interfaces. As well work is underway on Phoenix space platform [7], which will grab dead satellites, dismantle their antennas and other equipment. To each of the dismantled part or node a tiny spacecraft will be attached; original engine and ID will keep the unit at a given point in space. Thus, it will form a warehouse of parts for space satellites, which can be pulled out when needed.

Currently SpaceTech GmbH continues to work on the creation of multi-service spacecraft DEOS [8]. The main objectives are to provide rendezvous of service satellite with serviceable spacecraft, docking and relative orientation of satellites using service satellite's manipulator, docking with the spacecraft for replacement of equipment units or refueling, ensure a controlled descent from orbit or launch into the desired orbit and spacecraft flooding at the end of the mission.

Company Tethers Unlimited [9] continues to research and develop SpiderFab technology, allowing space platforms to use three-dimensional printing and robotic assembly for creating and combining large structures in orbit such as space antenna, solar panels and shields which ten times larger than existing folding options. By using this technology, the amount of cargo to be delivered into orbit will decrease in 30 times under the same weight, and total system size will be doubled.

Based on the above material, it can be concluded that the search for technical solutions for the creation of servicing satellites equipped with means of robotic support able to perform an orbital spacecraft service operations is relevant and useful task in the world community.

Analysis, classification and systematization of orbital servicing operations

Timely maintenance of space vehicles provides a qualitative implementation of its tasks for a longer time. The probability of onboard equipment failure may be compensated by the possibility of its maintenance and repair during in orbit spacecraft exploitation.

Servicing spacecraft tasks can range from the relatively simple task of inspection (remote and contact) to complex maintenance tasks such as refueling of uncooperative space vehicle. The entire set of orbital service operations can be divided into three main categories [10]: the elimination of failure, lifetime extension and other operations. The operations of failure elimination include:

– motion control: orbit correction – moving client spacecraft from incorrect initial delivery orbit;

* The Applied scientific investigations are carried out with the financial support of the Russian Federation represented by the Russian Ministry of Education and Science. The unique identifier of the Applied scientific investigations is RFMEFI57814X0046.

– repair and rehabilitation works: deployment – assistance in disclosing of solar panels, antennas and other deployable items;
– repair and rehabilitation works: repair or replacement of failed components.

Extending the spacecraft lifetime is possible with the following service operations:

– motion control: transportation – transfer of client spacecraft to a new work orbit to save fuel reserves;
– replenishment of consumables, refueling – replenishment of fuel, coolant and other consumable materials;
– repair and rehabilitation works: component replacement – replacement of worked-out elements, – also modernization in order to expand the functionality of satellite and reconfiguration.

In addition to elimination of failures and lifetime extension operations following service operations are possible:

– inspection (remoteorcontact) – inspection of client spacecraft with purpose of trouble shooting;
– motion control:de-orbiting (disposal/flooding) – moving of deenergized client spacecraft and space debrisfrom working orbit to disposal orbit or into the atmosphere;
– assemblyoperations – assembly of truss structures, space vehicles and space stations;
– disassembly – removal of functional units of worked-out spacecrafts in order to replace defective elements of malfunctioning space vehicles.

The operations mentioned above, except for remote inspection, involve docking of service satellite to client spacecraft. Docking with cooperative spacecraft can take place without the participation of means of robotic support, since the composition of service satellite may provide special docking devices to perform the operation using satellite's propulsion system. The docking of service satellite with uncooperative space vehicle can be carried out either with use of constructive elements of the latter, for example, the apogee motor nozzle, or using means of robotic support. Formation of technical configuration of service spacecraft means of robotic supportable to work with uncooperative space units must be carried out in each case by itself due to the lack of standardized solid and comfortable to grip client spacecraft's constructive elements.

The presence or absence of manipulators embodied in means of robotic support, and their number depends on the operations carried out by service satellite and type of serviced vehicle. It should be noted that at present time all operating satellites in orbit are uncooperative. At the same time, in contrast to foreign space vehicles, the majority of Russian satellites have no apogee motor nozzle since they inject into high orbits with special upper stage of "Breeze-M" [11]. Therefore, presence of manipulator system on service satellite for maintenance of Russian in orbit spacecrafts is required.

Generally, in terms of need for means of robotic support of service satellite, all the operations can be divided into two groups:

– operations that require presence of means of robotic support in form of manipulator system:
  а) contact inspection;
  б) transportation (disposal) of uncooperative spacecrafts using means of robotic support;
  в) reconfiguration, modernization, replacement of functional units;
  г) repair and rehabilitation works;
  д) replenishment of consumables;
  е) assembly operations using means of robotic support;
  ж) dismantling of spacecraft into its component parts.
– operations that can be performed without means of robotic support of service satellite:
  а) remote inspection;
  б) transportation using special docking station (with reference to cooperative space vehicles);
  в) refueling of spacecrafts with dedicated docking device interface for fuel transfer (in relation to cooperative spacecrafts);
  г) large space structures assembly of major target modules using their propulsion units (with reference to cooperative spececrafts).

Thus, operations of the second group can be performed only with cooperative space vehicles, development of which is not underway yet. The exception is for the remote inspection that can be carried out by any service satellites.

The composition and structure of means of robotic support of service spacecrafts

Execution of operations described in previous section is possible by various service satellites, thus composition options will be different in operation quality performance, applied technologies level, amount of material and time resources required for the development and production of proper means of robotic support. Generally, means of robotic support should be composed of a base unit, manipulator system, observation unit,changeable tools dispenser, payload cell, docking device. To maintain the operating temperature range in outer space, means of robotic support should have a common thermal control system. Power supply and communication with ground or orbital control center are realized by means of service spacecraft.

In RTC there were developed project designs of MRS based on one manipulator system (MRS-1) and MRS with three manipulators (MRS-3), description of which is given below. Approximate weight of MRS-1 is 318kg, MRS-3 – 548 kg. The presence of three manipulators composingMRS-3 makes it possible to maintain both cooperative and uncooperative space vehicles. Service satellite equipped with MRS-1 may serve spacecrafts, docking to which can occur via the docking device of MRS-1. General view of MRS-1 is shown in Figure 1.

The main element of MRS-1 is a 6 degrees of freedom (DoF) manipulator sufficient to perform necessary operations. Optionally, with use of 7 DoF manipulator arm the service area will expand and rounding various obstacles will be possible. Manipulator ends with tool fixation device.

Changeable tools dispenser is located on top of base unit. The dispenser has necessary removable tools for manipulator; dispenser fastening devices provide their attachment. The manipulator is attached to one side of base block, from other three sides of which a payload cells are attached with fixed functional units and an expansion tank (for refueling operations). Docking device is located in the middle and higher than dispenser so that after docking with client spacecraft manipulator could freely change tools.

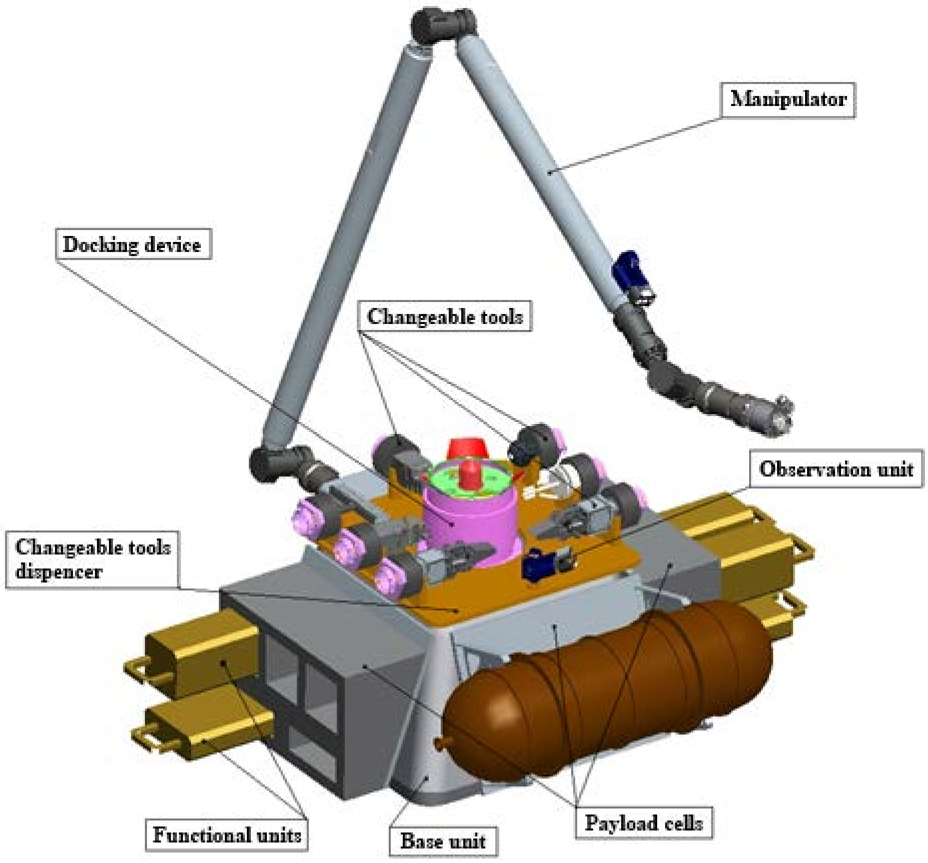


Fig. 1. General view of MRS-1

Performing of target operations begins with the grip of necessary tool from the dispenser. After seizing the tool by manipulator and connecting of suitable electrical connectors fastening device unlocks and changeable tool can be freely extracted for operation execution.

Contact inspection involves work of manipulator to identify various problems. As an option– cutting thermal blanket or another kind of mechanical impact on client space vehicle for visual access to the interior equipment.

On both sides of the base unit payload cells are arranged to accommodate functional blocks. One of them is to store breakdown or obsolete function blocks taken from client spacecrafts during the repair work, the other –for new units.

It is essential that replacement of functional units operations are only possible with promising cooperative spacecrafts specifically designed to allow this operation. Performing of these operation with currently orbiting space vehicles is impossible.

Opposite to manipulator on base block fuel tank is located. It is intended to refuel serviced spacecrafts. The refueling operation is carried out without the participation of manipulator via a special connection device interface. Thus, this operation is only possible with cooperative space vehicles.

Orbital assembly operations with use of one manipulator can be implemented in two scenarios: the assembly takes place directly on the target client spacecraft (building extra sections, deployment of solar panels or antennas); or assembly takes place in segments at service spacecraft with subsequent installation of finished segments on client space vehicle.

General view of MRS-3 is shown in Figure 2. MRS-3 differs from MRS-1 by presence of two additional identical 6 DoF manipulators.

All manipulators, as well as in MRS-1, end with tool fixation device. Additional manipulators are located instead of fuel tank, so service spacecraft performs refueling operation by pumping its own fuel.

Performing of target operations, as in case of MRS-1, begins with the capture of necessary tool from changeable tools dispenser. Contact inspection operation is conducted by manipulators teamwork and can be done much faster than in case ofMRS-1, because it does not require a tool change on each step.

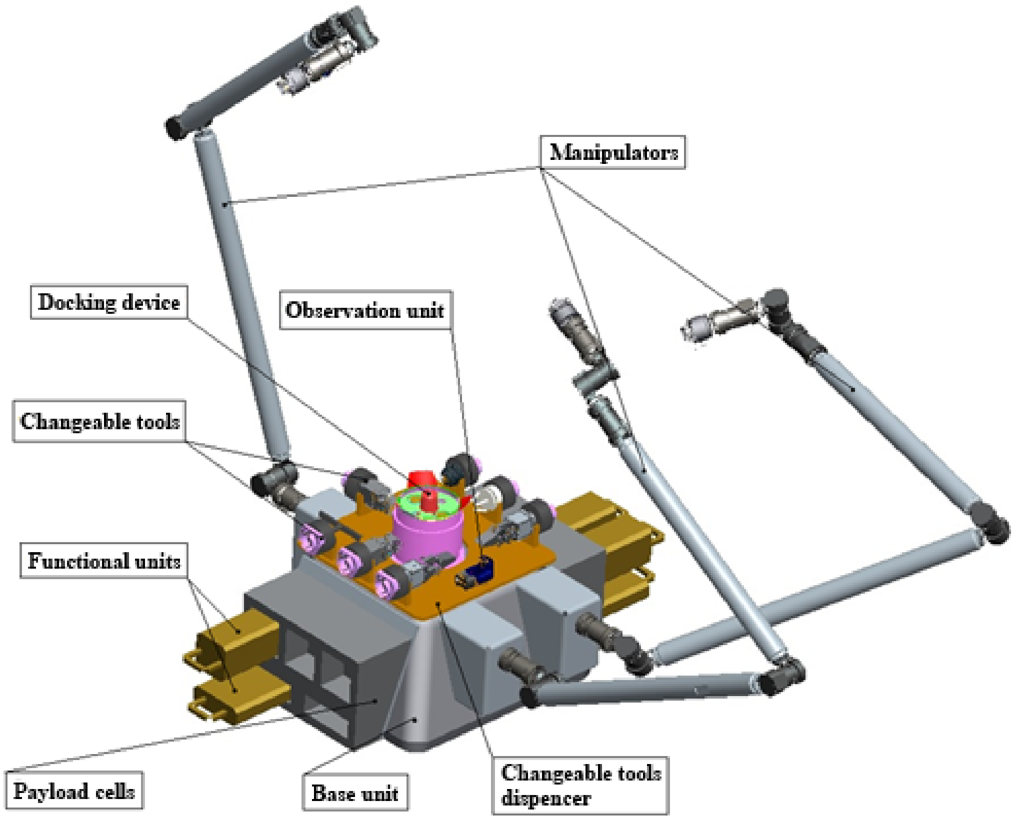


Fig. 2. General view of MRS-3

Operation of functional units replacement viaMRS-3 is no different from its execution by MRS-1, only MRS-3 can deal quicker with it.

The presence of three technological manipulators in MRS may require more changeable tools within the same nomenclature. Manipulators in stowed position are folded along the body of service spacecraft not overlapping overall dimensions.

Summary

Analyzing developed robotic systems design features of developed robotic systems, it can be concluded that MRS-1 is able to perform all necessary orbital service operations with either cooperative objects, or uncooperative objects with suitable to mate via docking device construction elements, such as apogee motor nozzle. Service satellite, equipped with MRS-1, is able to carry a larger number of functional blocks and fuel supply during orbit insertion than MRS-3.

MRS-3 is able to maintain cooperative and uncooperative space vehicles of arbitrary design. Some orbital maintenance operations of cooperative spacecrafts, for example, the replacement of functional units, service satellite equipped with MRS-3 can perform faster. However, such satellite performs refueling operation by its own fuel supply, which reduces its lifetime. The fuel tank is disposed on payload cell ofMRS-1, allowing to refuel more client spacecrafts.

Thus, maintenance of currently operated domestic satellites can only be performed by service satellites with MRS-3 after improvement of their identified limitations.

1. MiTExA [Electronicsource] / Free access: http://space.skyrocket.de/doc_sdat/mitex-a.htm, free. – Screen title.
2. MiTExB [Electronicsource] / Free access: http://space.skyrocket.de/doc_sdat/mitex-b.htm, free. – Screen title.
3. XSS (Experimental Spacecraft System), XSS-10 & XSS-11 Missions[Electronic source] / Free access: https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/v-w-x-y-z/xss, free. – Screen title.
4. CX-OLEV[Electronicsource] / Free access: https://artes.esa.int/projects/conexpress-orbital-life-extension-vehicle-cx-olev, free. – Screen title.
5. Orbital Express Space Operations Architecture [Electronic source] / Free access: http://archive.darpa.mil/orbitalexpress/index.html, free. – Screen title.
6. Kelm, B.E. FREND: Pushing the Envelope of Space Robotics[Electronic source]/ B.E. Kelm. - Space research and satellite technology, 2008 -. – Access mode: http://www.nrl.navy.mil/content_images/08Space_Kelm.pdf,free. – Screen title.
7. Phoenix[Electronic source] / Free access:http://www.darpa.mil/our_work/tto/programs/phoenix.aspx, free. – Screen title.
8. DEOS[Electronicsource] / Free access: http://www.spacetech-i.com/deutsche-orbitale-servicing-mission.html, free. – Screen title.
9. Tethers Unlimited[Electronic source] / Free access: http://www.tethers.com/SpiderFab.html, free. – Screen title.
10. Sullivan Rowland B. Technical and economic feasibility of telerobotic on-orbit satellite servicing – University of Maryland Space Systems Laboratory, 2005.
11. Scientifictechnicalreportabout research “Magistral’ (Zadel-Matrica)” (stage 4), – TSNIIMASH.

И.Ю. Даляев, И.В. Шардыко, Е.М. Кузнецова

ТЕХНИЧЕСКИЙ ОБЛИК СРЕДСТВ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СЕРВИСНОГО СПУТНИКА, ПРЕДНАЗНАЧЕННОГО ДЛЯ ПРОДЛЕНИЯ СРОКОВ АКТИВНОГО СУЩЕСТВОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ*

ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург
igor@rtc.ru, i.shardyko@rtc.ru, e.kuznecova@rtc.ru

Разработка, изготовление и запуск космических аппаратов имеет высокую стоимость, поэтому в настоящее время актуальной задачей является продление сроков их активной эксплуатации. Анализ зарубежного опыта показывает, что наиболее ценные и уникальные объекты, например, космический телескоп “Hubble”, неоднократно обслуживались и ремонтировались в открытом космосе астронавтами. Следует отметить, что подобные экспедиции сопряжены с определенным риском для жизни экипажей пилотируемых космических аппаратов и имеют чрезвычайно высокую стоимость. Очевидно, что такие операции предпочтительно осуществлять сервисными космическими аппаратами (КА), оснащенными средствами робототехнического обеспечения (СРТО).

В последние годы ведущие мировые державы ведут разработки, направленные на создание сервисных КА, с помощью которых будет возможно осуществлять орбитальное обслуживание функционирующих КА. Наибольшее внимание при создании сервисных спутников уделяется таким задачам, как инспекция [1, 2, 3], транспортировка [4] и управление движением, дозаправка, проведение ремонтно-восстановительных работ, проведение орбитальной сборки.

В 2007 г. был проведён космический эксперимент по программе OrbitalExpress [5], которая направлена на разработку автономной техники, выполняющей дозаправку и реконфигурацию КА непосредственно на орбите. В ходе экспериментаотрабатывалось сближение двух запущенных спутников – ASTRO с NextSat – в автоматическом режиме, манёвры с облётом в непосредственной близости (на расстоянии около 60 м), мягкий захват, стыковка, перекачка топлива, перенос и введение в рабочее состояние батарей и компьютеров, расстыковка и развод космических аппаратов.

В настоящее время под руководством DARPA продолжаются работы в рамках программы FREND [6] по созданию многофункционального сервисного КА, снабжённого робототехнической системой из трёх манипуляторов, которая позволяет стыковаться спроизвольным спутником, не оснащённым

* Работа выполняется при финансовой поддержке Минобрнауки России. Уникальный идентификационный номер проекта RFMEFI57814X0046

какими-либо стыковочными интерфейсами. А также ведутся работы над космической платформой Phoenix [7], которая будет захватывать мертвые спутники, производить демонтаж их антенн и другого оборудования. К каждой демонтированной детали или узлу будет прикреплен крошечный космический аппарат, своеобразный двигатель и идентификатор, который будет держать этот узел в заданной точке пространства. Таким образом будет сформирован целый космический склад запчастей для спутников, которые можно будет извлекать оттуда по мере необходимости.

В настоящее время компания SpaceTechGmbH продолжает работы по созданию многофункционального сервисного космического аппарата DEOS [8]. Основными целями разработки являются обеспечение сближения сервисного спутника с обслуживаемым КА, стыковка и взаимное ориентирование спутников с использованием манипулятора, расположенного на сервисном спутнике, стыковка с КА для замены блоков оборудования или дозаправки, обеспечения контролируемого спуска с орбиты или выведения на заданную орбиту и затопления обслуживаемого КА в конце миссии.

Компания TethersUnlimited [9] продолжает исследование и разработку технологии SpiderFab, позволяющей космическим платформам использовать трёхмерную печать и робототехническую сборку для создания и объединения больших конструкций на орбите таких, как космические антенны, солнечные батареи и щиты в десятки раз большие по размерам, нежели существующие сейчас складные варианты. При использовании этой технологии объем доставляемого на орбиту груза уменьшится в 30 раз при тех же массах, а размер итоговой системы увеличится в два раза.

Исходя из вышеописанного материала, можно сделать вывод, что поиск технических решений по созданию сервисных спутников, оснащенных СРТО, и способных выполнять орбитальное обслуживание КА, является актуальной и востребованной задачей в мировом сообществе.

Анализ, классификация и систематизация операций орбитального обслуживания

Своевременное обслуживание КА позволяет качественно и своевременно выполнять поставленные перед ним задачи более продолжительное время. Вероятность отказа бортового оборудования может быть скомпенсирована возможностью его технического обслуживания и ремонта в ходе эксплуатации КА на орбите.

Задачи сервисного КА могут варьироваться ототносительно простых задачи инспекции (дистанционной и контактной) до сложной задачи обслуживания, например, дозаправки некооперируемого КА. Всё множество сервисных операций орбитального обслуживания можно разделить на три основные категории [10]: устранение отказов, продление срока эксплуатации и прочие операции. К операциям *устранения отказов* относят:

- управление движением: <u>корректировка орбиты</u> – перемещение КА-клиента с неверного первоначального места доставки;
- ремонтно-восстановительные работы: <u>развёртывание</u> – помощь в раскрытии солнечных батарей, антенн и других развёртываемых элементов;
- ремонтно-восстановительные работы: <u>ремонт или замена</u> вышедших из строя компонентов.

Продление срока эксплуатации КА возможно при выполнении следующих сервисных операции:

- управление движением: <u>транспортировка</u>– перенос КА-клиента на новую рабочую орбиту для экономии запасов топлива спутника;
- <u>пополнение запасов расходных материалов, дозаправка</u> –пополнение запасов топлива, охлаждающей жидкости и других расходных материалов;
- ремонтно-восстановительные работы:<u>замена компонентов</u> –замена отработавших элементов, – а также <u>модернизация</u> с целью расширения функциональности спутника и <u>реконфигурация</u>.

Помимо операций устранения отказов и продления срока эксплуатации возможны также следующие сервисные операции:

- <u>инспекция (дистанционная или контактная)</u> –осмотр КА-клиента с целью осмотра, выявления неисправностей и прочего;
- управление движением: <u>увод с орбиты(захоронение/затопление)</u> – перемещение нерабочего КА-клиента и космического мусора с рабочей орбиты на орбиту захоронения или в атмосферу;
- <u>сборочные операции</u> – сборка ферменных конструкций, космических аппаратов и станций;
- <u>разборка</u> – извлечение функциональных блоков отработавших КА с целью замены элементов в неисправных КА.

Вышеперечисленные операции, кроме дистанционной инспекции, предполагают проведение стыковки сервисного спутника с КА-клиентом. Стыковка с кооперируемым КА может происходить без участия СРТО, так как в его составе могут быть предусмотрены специальные стыковочные устройства, позволяющие выполнять операцию за счёт двигательной системы сервисного КА. Стыковка сервисного спутника с некооперируемым КА может проводиться либо за конструктивные элементы последнего, например, сопло апогейного двигателя, либо с использованием СРТО. Формирование технического облика СРТО сервисного КА, обслуживающего некооперируемый аппарат, должно осуществляться в каждом случае отдельно ввиду отсутствия унифицированных достаточно прочных и удобных для захвата конструктивных элементов КА-клиента.

Наличие или отсутствие манипуляторов, входящих в состав СРТО, и их количество зависит от операций, проводимых сервисным спутником, и типа обслуживаемого объекта. Стоит отметить, что в настоящее время все действующие КА, находящиеся на орбите, являются некооперируемыми. При этом, в отличие от зарубежных, большинство российских спутников не имеют сопел апогейных двигателей, так как выводятся на высокие орбиты специальным разгонным блоком «Бриз-М» [11]. Поэтому для обслуживания ныне эксплуатируемых российских КА наличие манипуляционной системы на сервисном спутнике обязательно.

В общем виде, с точки зрения необходимости СРТО сервисных КА, все перечисленные операции можно разделить на две группы:

- операции, требующие наличия СРТО в виде манипуляционных систем:
  - з) контактная инспекция;
  - и) транспортировка (захоронение) некооперируемых КА с применением СРТО;
  - к) реконфигурация, модернизация, замена функциональных блоков;
  - л) ремонтно-восстановительные работы;
  - м) пополнение запасов расходных материалов;
  - н) сборочные операции с применением СРТО;
  - о) разборка КА на составные части.
- операции, которые могут быть выполнены без СРТО сервисных КА:
  - д) дистанционная инспекция;
  - е) транспортные операции с использованием специального стыковочного устройства (применительно к кооперируемым КА);
  - ж) дозаправка КА, имеющих в своем составе специализированное стыковочное устройство с интерфейсом для перекачки топлива (применительно к кооперируемым КА);
  - з) сборка больших космических конструкций из крупных целевых модулей с использованием двигательных установок модулей (применительно к кооперируемым КА).

Таким образом, операции второй группы могут производиться только с кооперируемыми КА, разработка которых в настоящее время ещё не ведется. Исключением является дистанционная инспекция, которая может выполняться любым сервисным КА.

Состав и структура СРТО сервисных КА

Выполнение операций, описанных в предыдущем разделе, возможно различными сервисными КА, при этом варианты состава будут различаться показателями качества выполнения задач, уровнем применяемых технологий, объёмами материальных и временных ресурсов, требуемых для разработки и изготовления соответствующих СРТО. В общем случае СРТО должны иметь в своем составе блок базовый, манипуляционную систему, обзорный блок, магазин сменного инструмента (МСИ), отсек полезной нагрузки, стыковочное устройство. Для поддержания рабочего диапазона температур в условиях открытого космического пространства, СРТО должны иметь общую систему обеспечения теплового режима (СОТР). Энергообеспечение и связь с наземным или орбитальным пультом управления реализуются средствами сервисного КА.

В ЦНИИ РТК были разработаны проектные облики СРТО на основе одного манипулятора (СРТО-1) и СРТО на основе трех манипуляторов (СРТО-3), описание составов которых приведено ниже. Ориентировочная масса СРТО-1 составляет 318кг, СРТО-3 – 548 кг. Наличие трех манипуляторов в составе СРТО-3 дает возможность обслуживать как кооперируемые, так и некооперируемые КА. Сервисный спутник, оснащенный СРТО-1, может обслуживать КА, стыковка с которыми может происходить с помощью стыковочного устройства СРТО-1. Общий вид СРТО-1 представлен на рисунке 1.

Основным элементов СРТО-1 является манипулятор, который имеет шесть степеней подвижности, достаточных для выполнения необходимых операций. Возможен вариант с применением семистепенного манипулятора для расширения сервисной зоны и огибания манипулятором различных препятствий. Оканчивается манипулятор устройством фиксации сменного инструмента.

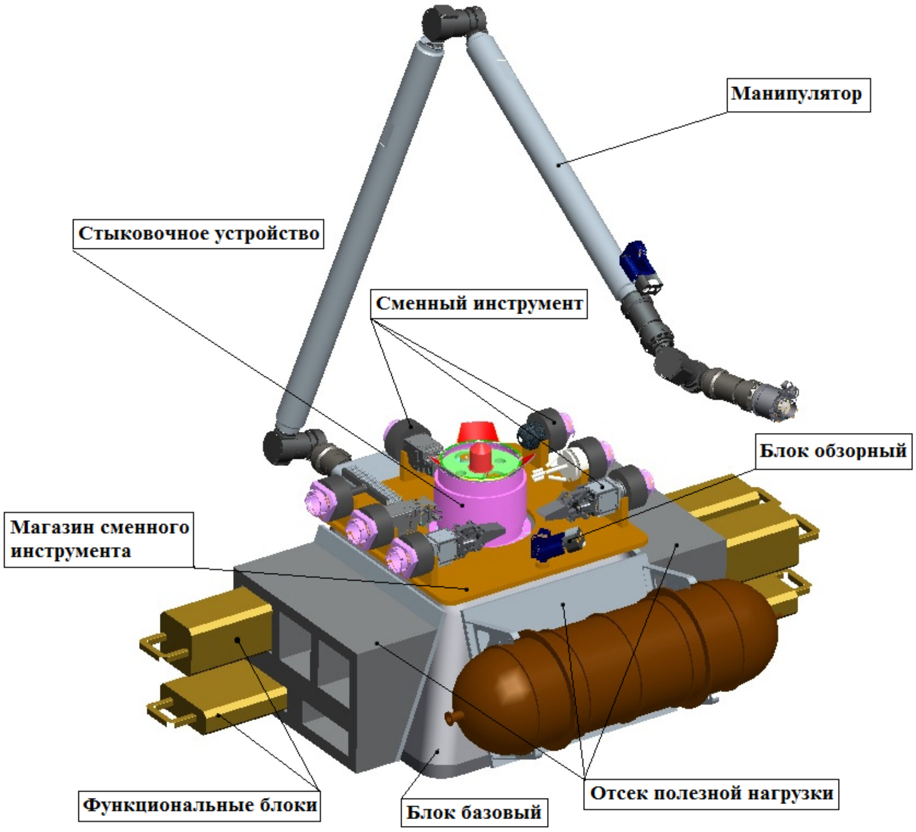


Рис. 1. Общий вид СРТО-1

Магазин сменного инструмента (МСИ) располагается сверху блока базового. В магазине располагаются необходимые сменные инструменты для манипулятора, фиксация которых производится за счет устройств крепления МСИ. Манипулятор крепится с одной стороны блока базового, с трех других сторон к нему крепится отсек полезной нагрузки, на котором закреплены функциональные блоки и расширительный топливный бак (для операции дозаправки). Стыковочное устройство располагается в середине и выше МСИ таким образом, чтобы после стыковки с КА-клиентом манипулятор мог беспрепятственно менять инструмент.

Выполнение целевых операций начинается с захвата манипулятором необходимого инструмента из МСИ. После захвата инструмента манипулятором и соединения соответствующих электроразъёмов происходит размыкание устройств крепления МСИ, и сменный инструмент свободно извлекается для выполнения операций.

Контактная инспекция подразумевает работу манипулятора при выявлении тех или иных неполадок. Как вариант операции – разрезание экранно-вакуумной теплоизоляции или иной вид механического воздействия на КА-клиент для визуального доступа к внутренней аппаратуре.

С двух сторон блока базового располагаются отсеки полезной нагрузки для размещения функциональных блоков. В один из них устанавливаются отказавшие или морально устаревшие функциональные блоки, снятые с обслуживаемого КА-клиента при проведении ремонтно-восстановительных работ, в другой – новые блоки.

Существенным является тот факт, что операции обслуживания и замены функциональных блоков возможны исключительно с перспективными кооперируемыми космическими аппаратами, специально разработанными с учетом возможности замены функциональных блоков. Выполнение этих операций с КА, которые находятся на данный момент на орбитах Земли, невозможно.

С другой стороны от манипулятора на блоке базовом располагается бак для топлива, предназначенного для дозаправки обслуживаемых КА. Операция дозаправки осуществляется без участия манипулятора через специальный интерфейс стыковочного устройства. Таким образом данная операция возможна только с кооперируемыми КА.

Операции орбитальной сборки посредством одного манипулятора могут быть реализованы по двум сценариям: сборка происходит непосредственно на целевом КА-клиенте (наращивание габаритов, установка дополнительных секций, развертывание солнечных батарей или антенн); либо сборка происходит посегментно на сервисном КА с последующей установкой готовых сегментов на КА-клиент.

Общий вид СРТО-3 представлен на Рис. 2. СРТО-3отличается от СРТО-1 наличием дополнительно двух идентичных шестистепенных манипуляторов.

Все манипуляторы, как и в СРТО-1, оканчиваются устройством фиксации сменного инструмента. Дополнительные манипуляторы располагаются вместо топливного бака, поэтому операцию дозаправки сервисный КА выполняет путем перекачки своего топлива.

Выполнение целевых операций, как и в случае СРТО-1, начинается с захвата необходимого инструмента из МСИ. Задача контактной инспекции решается совместной работой манипуляторов и может выполняться существенно быстрее, нежели посредством варианта СРТО-1, т.к. не потребует на каждом этапе производить смену инструмента.

Выполнение задачи замены функциональных блоков посредством СРТО-3 ничем не отличается от ее выполнения посредством СРТО-1, только СРТО-3 может справиться с ней быстрее.

Наличие трех технологических манипуляторов у СРТО может потребовать больше сменного инструмента в рамках той же номенклатуры. Манипуляторы в транспортном положении складываются вдоль корпуса сервисного КА, не выступая за габариты.

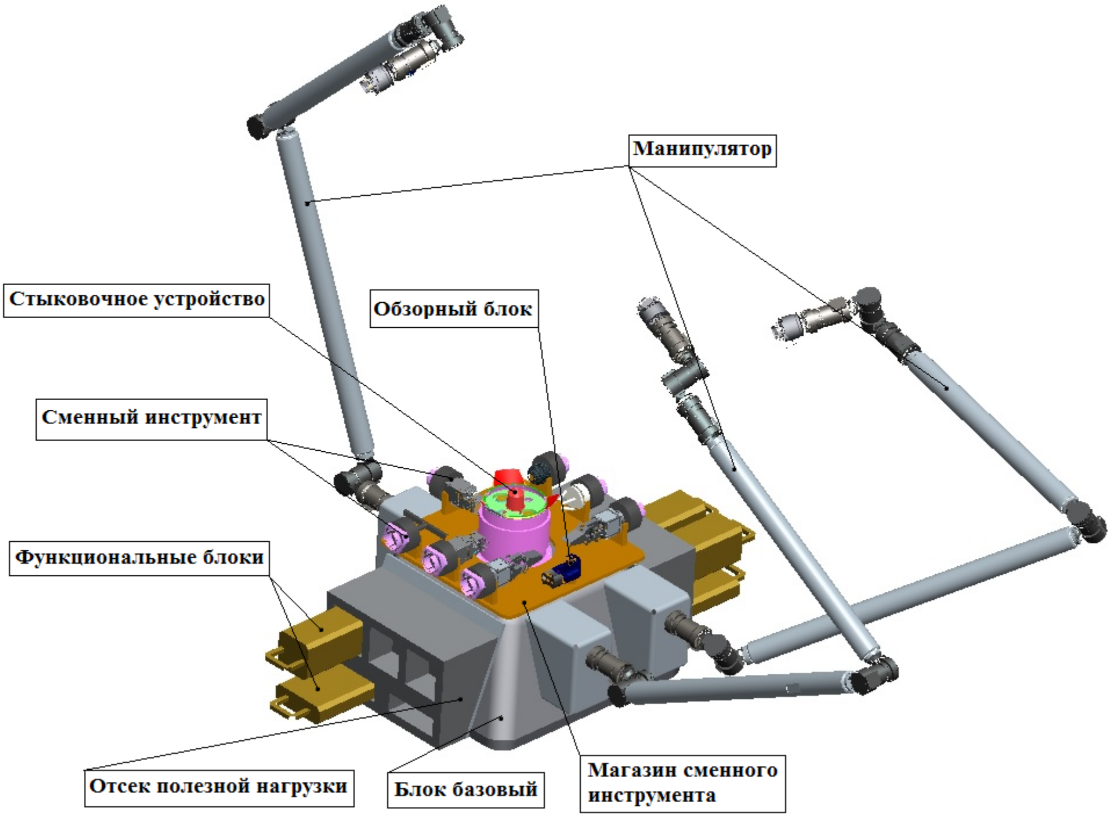


Рис. 2. Общий вид СРТО-3

Вывод

Анализируя конструктивные особенности разрабатываемых робототехнических комплексов, можно сделать вывод, что СРТО-1 способен выполнять все необходимые операции орбитального обслуживания либо с кооперируемыми объектами, либо с некооперируемыми объектами, имеющими в своем составе элементы конструкции, например, сопло апогейного двигателя, для стыковки с которыми можно использовать стыковочное устройство. Сервисный спутник, оснащенный СРТО-1, способен перевозить большее количество функциональных блоков и запаса топлива при выведении, чем СРТО-3.

СРТО-3 способен обслуживать и кооперируемые, и некооперируемые КА произвольной конструкции. При этом некоторые операций орбитального обслуживания кооперируемых КА, например, замена функциональных блоков, сервисный спутник, оснащенный СРТО-3, может выполнять быстрее. Однако, операции дозаправки таким спутником выполняет за счет собственного запаса топлива, что уменьшает его ресурс. Топливный бак, размещенный на отсеке полезной нагрузки СРТО-1, позволяет производить дозаправку большего количества КА-клиентов.

Таким образом, обслуживание эксплуатирующихся в настоящее время отечественных КА возможно только сервисным спутником, оснащенным СРТО-3, выявленные недостатки которого нуждаются в доработке.

1. MiTExA [Электронный ресурс] / Свободный доступ: http://space.skyrocket.de/doc_sdat/mitex-a.htm, свободный. – Загл. с экрана.
2. MiTExB [Электронный ресурс] / Свободный доступ: http://space.skyrocket.de/doc_sdat/mitex-b.htm, свободный. – Загл. с экрана.
3. XSS (Experimental Spacecraft System), XSS-10 &XSS-11 Missions [Электронный ресурс] / Свободный доступ: https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/v-w-x-y-z/xss, свободный. – Загл. с экрана.
4. CX-OLEV [Электронный ресурс] / Свободныйдоступ:https://artes.esa.int/projects/conexpress-orbital-life-extension-vehicle-cx-olev, свободный. – Загл. с экрана.
5. Orbital Express Space Operations Architecture [Электронный ресурс] / Свободный доступ: http://archive.darpa.mil/orbitalexpress/index.html, свободный. – Загл. сэкрана.
6. Kelm, B.E. FREND: Pushing the Envelope of Space Robotics [Электронный ресурс]/ B.E. Kelm. - Space research and satellite technology, 2008 -. – Режим доступа: http://www.nrl.navy.mil/content_images/08Space_Kelm.pdf,свободный. – Загл. сэкрана.
7. Phoenix [Электронный ресурс] / Свободный доступ:http://www.darpa.mil/our_work/tto/programs/phoenix.aspx, свободный. – Загл. с экрана.
8. DEOS[Электронный ресурс] / Свободный доступ: http://www.spacetech-i.com/deutsche-orbitale-servicing-mission.html, свободный. – Загл. с экрана.
9. Tethers Unlimited[Электронный ресурс] / Свободный доступ: http://www.tethers.com/SpiderFab.html, свободный. – Загл. с экрана.
10. Sullivan Rowland B. Technical and economic feasibility of telerobotic on-orbit satellite servicing – University of Maryland Space Systems Laboratory, 2005.
11. Научно-технический отчёт о НИР “Магистраль (Задел-Матрица)” (этап 4), – ЦНИИмаш

A. Vasiliev

JUSTIFICATION OF REQUIREMENTS TO MOBILE ROBOTIC SYSTEM FOR GEOLOGICAL INVESTIGATION ON A MOON SURFACE

RTC, Saint-Petersburg, Russia
andrspan@yandex.ru

А.В. Васильев

ОБОСНОВАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К МОБИЛЬНОЙ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ ДЛЯ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ РАЗВЕДКИ НА ПОВЕРХНОСТИ ЛУНЫ

ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург
andrspan@yandex.ru

Введение

Исследование и освоение ресурсов Луны на сегодняшний день является одной из первоочередных задач по освоению космического пространства [1]. Луна является наиболее близким к Земле крупным небесным телом, источником важных природных ресурсов, уникальной базой для проведения астрофизических и других научных исследований, а в перспективе может рассматриваться как опорный пункт для дальних пилотируемых космических путешествий.

Важнейшим этапом освоения Луны должны стать исследования на её поверхности с помощью сети стационарных и самоходных научных станций [2, 3].

Следовательно, особую роль в освоении Луны будут играть мобильные робототехнические системы (МРТС), способные выполнять транспортные и ряд других задач на её поверхности. Первые этапы освоения Луны будут осуществляться с помощью только автоматических аппаратов, последующие – с использованием автоматических и пилотируемых луноходов.

Исходя их этого, просматривается следующий типоразмерный ряд напланетных транспортных средств, которые будут востребованы в ходе предварительных исследований Луны, развёртывания и последующей поддержки функционирования инфраструктуры перспективной ЛБ [1]:

- исследовательский (проведение научных исследований на поверхности Луны, поиск места для ЛБ);
- рабочий луноход (выполнение технологических и манипуляционных работ по обслуживанию инфраструктуры ЛБ на этапе её формирования и дальнейшей эксплуатации, выполнение транспортных задач по перевозке грузов и космонавтов на небольшие расстояния (общей грузоподъёмностью до 500 кг или 810 Н в условиях лунной гравитации);

– тяжелый транспортный луноход для перемещения модулей будущей ЛБ и транспортировки космонавтов в течение длительного времени внутри защищённой герметизированной кабины (обеспечивающей автономное проживание экипажа из 2-3 человек до 5 суток).

Целью первого этапа освоения Луны будут исследования на ее поверхности в наиболее значимых с научной точки зрения областях, проведение геологической разведки основных ресурсов, необходимых для будущего обеспечения деятельности человека [3].

Одним из важнейших методов геологической разведки является колонковое бурение, позволяющее произвести прямое измерение мощности реголита. Геологическую разведку Луны этим методом предполагается осуществлять как с помощью стационарных платформ, так и с помощью самоходных платформ (исследовательских луноходов), оснащённых буровой установкой.

Создание отечественных напланетных МРТС, оснащенных буровой установкой, позволит:

– дополнить существующие на текущий момент сведения о строении и происхождении Луны;
– производить геологическую разведку и исследование наиболее значимых областей Луны;
– определить наиболее перспективные районы развёртывания временной или постоянно действующей ЛБ, объектов промышленного производства и др.

Объект исследования

В настоящей работе исследуются пути создания лунохода, предназначенного для геологической разведки на поверхности Луны с помощью каротажно-буровой установки (КБУ) и проведения широкого спектра научных исследований вдоль маршрута следования.

Сценарий исследований с помощью такой МРТС предложен ГЕОХИ РАН и предполагает:

– работу в наиболее интересных с геологической точки зрения областях (рассматриваются несколько вариантов возможных маршрутов);
– движение по маршруту протяженностью до 400-500 км;
– бурение нескольких скважин глубиной до 3-5 м с отбором полных стратифицированых колонок лунного грунта;
– отбор с поверхности образцов лунного грунта;
– проведение активных сейсмических исследований;
– проведение широкого спектра научных исследований;
– развертывание на месте одной из скважин долговременной автоматической научной станции;
– доставка и перегрузка собранных образцов на лунный взлетно-посадочный комплекс (ЛВПК).

Совокупность предъявляемых к МРТС требований наделяет её рядом уникальных особенностей. Обзор созданных ранее и разрабатываемых в настоящее время стационарных и самоходных аппаратов, оснащенных буровыми установками для проведения исследований на поверхности других небесных тел, показывает, что аналогов рассматриваемому МРТС не существует. Текущие исследования, проводимые за рубежом по схожим направлениям, во многом ограничены и предполагают бурение неглубоких скважин, проведение краткосрочных миссий с охватом небольшой геологической области (ограниченность области и времени исследований), не предусматривают доставку образцов грунта на Землю [4, 5].

Состав МРТС

Рассматриваемая МРТС должна включать в себя: самоходное шасси, КБУ, манипуляционную систему, комплекс научных приборов, систему энергообеспечения, систему терморегулирования, радиокомплекс, систему управления, навигационную систему, систему технического зрения.

Обоснование требований к составным частям МРТС производится, во-первых, исходя из условий функционирования МРТС, во-вторых, исходя из предполагаемых сценариев выполнения поставленных задач.

Анализ условий функционирования МРТС

Назначение МРТС предполагает её функционирование в чрезвычайно жёстких условиях, характеризуемых следующими факторами [6]:

- отсутствие атмосферы;
- большие изменения температуры на поверхности (от -150 °С до +130 °С);
- пониженная гравитация (1,62 м/с^2);
- жёсткое космическое излучение (радиация);
- сильная засветка солнечным освещением чувствительных элементов оптических приборов;
- метеоритная бомбардировка поверхности.

Требования к системе передвижения

С точки зрения передвижения поверхность Луны в морских районах представляет собой кратерно-холмистую местность, насыщенную каменистыми включениями. Материковые (горные) районы представляют собой труднопроходимые и непроходимые для луноходов горные массивы, высота отдельных вершин которых достигает 10 км. Материковые районы занимают около 75 % всей поверхности Луны [7].

Поверхность Луны – слой мелкого раздробленного вещества – реголита, образованного постоянными метеоритными бомбардировками. В результате исследований советскими и американскими аппаратами было установлено, что различие в геоморфологической обстановке в районах их работы оказывает малое влияние на физико-механические свойства грунта. Поэтому можно рассматривать средние, наиболее типичные параметры грунта в естественном залегании, для достаточно обширных районов Луны. Грунт по трассе движения «Лунохода-1» представлял собой мелкозернистый материал, обладающий заметными силами сцепления (слипаемостью) [8]. Самый верхний слой представлял собой пылевидный, легко деформируемый материал. Мелкозернистый слой грунта в основном имел глубину от 5 до 10 см и был достаточно однороден по глубине.

Измерения несущей способности грунта показали значительную неоднородность механических свойств по трассе движения лунохода – от 0,2 до 1,0 кг/см^2 (20 – 100 кПа). Наиболее часто (60 %) встречаются участки грунта с несущей способностью от 25 до 55 кПа, такие значения характерны для относительно ровных участков и межкратерных пространств. В ходе движения "Лунохода-1" наиболее часто (46 %) несущая способность была равной величине 0,34 кг/см^2 (34 кПа) [6, 8].

Наиболее сложными участками лунной поверхности с точки зрения обеспечения передвижения являются отложения рыхлого грунта в сочетании с большими уклонами на склонах кратеров.

В качестве количественной характеристики крутизны стенок кратера используется отношение его глубины к диаметру – H/D. Анализ статистического распределения кратеров в морских районах и по пути, пройденному «Луноходом-1» показывает [7], что подавляющая часть кратеров в рассмотренных районах – до 97 % – представлена кратерами классов С, ВС и В. Доля "молодых" кратеров (А и АВ) не превышает 3 %. Наиболее часто встречаются кратеры классов С и ВС с углом наклона стенок, не превышающим 20°.

Характерными элементами лунной поверхности являются также камни и каменные гряды. Камни наиболее часто встречаются вблизи кратеров. При этом, чем больше кратер, тем больше вокруг него камней. Особенно резко возрастает количество камней у кратеров диаметром более 20 м. Значительная часть камней сосредоточена в пределах вала кратера.

Статистика распределения камней различных размеров приведена в [7]. Выявленные закономерности показывают: наиболее каменистой является поверхность ударных кратеров, относящихся к особой морфологической группе, и кратеров класса А, наименее каменистой – поверхность кратеров класса С и межкратерного пространства. При этом наибольшее количество встречаемых камней имеют размеры в поперечнике от 2 до 15 см. Вероятностное количество камней размерами от 2 до 5 см: до 20 на 1 м^2; размерами от 10 до 15 см: до 40 на 100 м^2, камни размерами более 15 см встречаются еще реже.

Всё это позволяет сформулировать следующие требования к системе передвижения МРТС:

- передвижение по сыпучим грунтам со скоростью до 5 км/ч;
- преодоление подъёмов и спусков с уклонами до 20°;
- преодоление одиночных камней высотой до 0,2…0,25 м.

Каротажно-буровая установка

КБУ предназначена для проведения многоразового бурения вдоль маршрута следования МРТС, отбора полных стратифицированных колонок грунта (кернов), перегрузки кернов в приёмные кассеты, проведения исследований в скважинах с помощью каротажного зонда. Основными частями КБУ являются: корпус (силовая ферма), буровая головка, буровые штанги с пробоотборниками, устройство для удлинения буровых штанг, комбинированный коратажный зонд, механизм подачи каротажного зонда и пробоотборника.

В качестве прототипа КБУ на первых этапах работы рассматривается модифицированная установка, описанная в [1]. Предварительные требования к КБУ: масса не более 120 кг, габаритная длина не более 4 м, глубина бурения 3 м (с возможностью увеличения до 5…6 м в зависимости от текущей геологической ситуации).

Манипуляционная система

Требуемая функциональность манипулятора МРТС определяется тремя классами задач, которые предполагается решать с помощью него: задачи поддержки научных исследований, погрузочно-разгрузочные задачи, вспомогательные функции по обслуживанию систем МРТС.

К первому классу задач относятся: забор проб поверхностного грунта и обломочных материалов (небольших камней), поддержка исследований минералогического состава грунта с помощью инфракрасного спектрометра, разворачивание и размещение температурного зонда в одной из скважин, установка на поверхность приборов для проведения активных сейсмических исследований, размещение на поверхности компонентов автоматической научной станции. Погрузочно-разгрузочные операции заключаются в перегрузке контейнеров с отобранными пробами на ЛВПК. Операции по обслуживанию МРТС включают проведение дистанционного контроля оптическими средствами внешнего состояния частей МРТС, очистку от пыли ответственных поверхностей и др.

Предварительные требования к манипулятору: максимальная грузоподъёмность от 40 до 80 Н, радиус рабочей зоны с грузом максимального веса около 1,8…2,5 м, радиус зоны обслуживания около 2,5…3,0 м (в зависимости от места размещения манипулятора на МРТС).

Общие требование к МРТС

Комплекс научных приборов МРТС предназначен для проведения широкого спектра научных исследований: магнитометрии, гравиметрии, сейсмических исследований (активных и пассивных), измерений мощности реголита радиофизическими методами, инфракрасной спектрометрии, масс-спектрометрии. Также предполагается размещение в районе одной из скважин автоматической научной станции, включающей стационарный сейсмометр, магнитометр, термозонд, гравиметр, детектор космических излучений, лазерный уголковый отражатель. В качестве прототипов приведённых приборов рассматриваются аналогичные по назначению приборы, разрабатываемые в рамках проектов «Луна-Глоб», «Луна-Ресурс», а также применявшиеся в уже построенных аппаратах: «Луноход-1», «Луноход-2», «Curiosity».

Требования к рассматриваемым приборам определяются их функциональным назначением, сценариями применения и размещением внутри или снаружи защищённого приборного отсека МРТС. Общая масса научного оборудования не должна превышать 250 кг. Требуемая грузоподъёмность шасси МРТС при этом, с учётом массы манипулятора, КБУ и суммарной массы отбираемых с поверхности проб, составляет около 600 кг.

Энергосистема МРТС должна обеспечивать питание всех потребителей и научных приборов с учётом предполагаемых циклограмм их работы. Ориентировочная оценка мощности энергосистемы составляет около 1,6…1,7 кВт при требуемой энергоёмкости буферных источников питания порядка 12 кВт·ч.

Система терморегулирования предназначена для обеспечения заданных тепловых режимов работы составных частей и научных приборов МРТС, установленных внутри и снаружи приборного отсека. Обеспечение работоспособности оборудования в жёстких температурных условиях на Луне возможно только за счёт комбинирования пассивных и активных средств терморегулирования. В качестве активных элементов выступают блок обогрева МРТС на основе радиоизотопного источника тепла, горячий и холодный контуры с активной циркуляцией теплоносителя, радиаторные блоки, локальные электронагреватели. К пассивным средствам относятся: экранно-вакуумная теплоизоляция, нанесение покрытий с соответствующими оптическими коэффициентами на наружные поверхности, создание локальных «тепловых мостов».

Радиокомплекс МРТС является частью общей системы информационно-командных каналов связи между МРТС и пунктами управления. Бортовая приёмо-передающая аппаратура МРТС должна обеспечивать приём команд управления и передачу служебной и научной информации как напрямую на Землю, так и через ретрансляторы, которые могут располагаться как на поверхности Луны, так и на лунных орбитальных космических аппаратах.

Система управления МРТС решает задачи обработки информации и выдачи команд на объекты управления (приводы шасси, КБУ, манипулятор, модули ориентации антенн, телекамер, управление работой научных приборов и т.д.) при как непосредственном дистанционном (телеоператорном) режиме работы, так и в автономном режиме, когда МРТС движется самостоятельно в заданную целевую точку. При этом последний режим рассматривается как основной, а дистанционное управление – как резервный (либо аварийный, либо для выполнения операций, требующих непосредственного участия оператора).

В силу специфики условий функционирования МРТС (ограниченность каналов связи и получаемой с борта информации об окружающей обстановке) единственным путём повышения эффективности работы МРТС является повышение уровня её автономности.

Применение автономной системы управления движением позволяет: расширить объём решаемых транспортных задач, повысить эффективность за счёт рационального использования времени между сеансами связи, снизить нагрузку на операторов. В то же время применение на автоматических аппаратах системы дистанционного управления в качестве дублирующей схемы управления также нельзя недооценивать. Это позволяет повысить надёжность МРТС в целом и продолжить, хотя и при меньшей эффективности, выполнение задач при каких-либо неполадках в схеме автономного управления [6].

Особенностью системы управления в части планирования траекторий движения является необходимость решения достаточно сложной задачи по объезду непреодолимых участков местности большой протяжённости со значительными отклонениями от целевого маршрута. Хотя, в случае наличия априорной информации о районе работы МРТС (картографическая база данных, составленная по материалам топологической съёмки орбитальными аппаратами) и возможности планирования его движения по относительно спокойному маршруту, решение задачи объезда препятствий можно существенно упростить.

Для своевременного выявления опасных ситуаций в состав системы управления МРТС должен входить контур безопасности, имеющей высший приоритет. В задачи этого контура входит заблаговременное (в зависимости от текущей скорости движения МРТС) детектирование характера и типа препятствия с целью исключения возникновения аварийных ситуаций и оперативного пересчёта маршрута в объезд внезапно обнаруженных непреодолимых препятствий.

Система безопасности должна обеспечивать непрерывный контроль по различным каналам (в том числе, путём интеграции с другими системами) за текущим состоянием МРТС и качеством функционирования её основных подсистем. Информация о контролируемых параметрах должна иметь приоритетный характер, и её передача должна происходить по кратчайшим каналам от источника информации к исполнительным приводам.

К такой информации относятся сообщения о возникновении следующих аварийных ситуаций [6]:

- предельно допустимых углов крена и дифферента МРТС;
- предельно допустимых величин буксования одного или обоих бортов;
- предельно допустимого бокового сползания лунохода;
- предельно допустимых нагрузок одного или нескольких тяговых электроприводов;
- предельно допустимого (минимального значения) расстояния от поверхности до днища корпуса;
- одновременного включения двигателя и тормоза;
- отсутствия вращения колёс;
- непрохождения тестовых программ самодиагностики подсистем МРТС.

Особое место в структуре МРТС занимают системы навигации и технического зрения. Навигационная система совместно с системой технического зрения должны обеспечивать:

- определение текущего положения МРТС, параметров движения;
- формирование глобальных и локальных траекторий движения;
- своевременное определение типов и размеров препятствий с целью принятия решений по их объезду или преодолению и недопущению аварийных ситуаций;
- работоспособность в условиях пониженной гравитации, радиационных излучений, световой засветки от солнечного излучения;
- соблюдение равнозначности направлений движения лунохода вперёд и назад.

Заключение

Выполнено исследование современного уровня технологий, необходимых для построения лунохода для геологической разведки на поверхности Луны. Сформирован состав и общие технические требования к отдельным подсистемам и к луноходу в целом. К проблемным вопросам на сегодняшний день можно отнести отсутствие проработок на более-менее детальном уровне ряда научных приборов и, в особенности, КБУ. Дальнейшие работы связаны с поисковыми исследованиями, направленными на формирование технического облика МРТС.

1. Курс на Луну коррекции не подлежит [Электронный ресурс] // EXPERT.RU: деловой общенациональный аналитический ресурс "Эксперт Online". – Дата публикации 27.04.2015. – №18-19 (944). – URL: http://expert.ru/expert/2015/18/kurs-na-lunu-korrektsii-ne-podlezhit/ (дата обращения 01.05.2015).
2. Луна – шаг к технологиям освоения Солнечной системы / под научн. ред. В.П. Легостаева и В.А. Лопоты. – М: РКК «Энергия», 2011. – 584 с.
3. Фундаментальные космические исследования / под научн. ред. д-ра техн. наук. проф. Р.Р. Райкунова. – В 2-х кн. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. – Кн.2: Солнечная система. – 456 с.
4. RESOLVE. Lunar Ice/Volatile Payload Development and Field Test Status / Presentation to LEAG (Oct., 24, 2012). – Системные требования: Acrobat Reader. URL: http://www.lpi.usra.edu/meetings/leag2012/presentations/Sanders.pdf (дата обращения 29.03.2015).
5. Design of the Scarab Rover for Mobility and Drilling in the Lunar Cold Traps / Bartlett P., Wettergreen D., Whittaker W.L.; Carnegie Mellon University // International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space, February, 2008. – Системные требования: Acrobat Reader. URL: http://www.ri.cmu.edu/pub_files/2009/1/09aiaa.scarab.pdf (дата обращения 29.03.2015).

6. Планетоходы / А.Л. Кемурджиан, В.В. Громов, И.Ф. Кажукало, М.И. Маленков, В.К. Мишкинюк, В.Н. Петрига, И.И. Розенцеейг; под ред. А.Л. Кемурджиана.- 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1993. – 400 с.
7. Передвижная лаборатория на Луне Луноход-1 / под ред. В.Л. Барсукова. – М.: Наука, 1978. – Т.2. – 184 с.
8. Передвижная лаборатория на Луне Луноход-1 / под ред. А.П. Виноградова. – М.: Наука, 1971. – Т.1. – 128 с.

Yu.V. Lonchakov, V.A. Sivolap, I.G. Sokhin

ERGONOMIC PROBLEMS OF CREATION OF ANTROPOMORPHIC ROBOTIC CREW ASSISTANTS FOR FUTURE SPACE MISSIONS

State Organization «Gagarin Research&Test Cosmonaut Training Center», Korolev city, Moscow region
i.sokhin@gctc.ru

Abstract

Nowadays the problems of creation of anthropomorphic robotic crew assistants and their application in interplanetary missions are widely discussed. The ergonomic aspects, which are usually neglected, have a great influence on the performance of robotic crew assistants.

The article considers a comprehensive approach, developed in the CTC, to the problem of ergonomic requirements for ergatic system “cosmonaut - anthropomorphic robot – professional environment”, which is based on the optimization of influence of human, technical and environmental factors on the efficiency of ergatic system.

Introduction

Global tends demonstrate that strategic development prospects of manned cosmonautics are associated with more effective use of low earth orbit, lunar exploration and implementation of interplanetary missions (first of all to Mars and nearby asteroids). In comparison with manned space flights round the Earth, the preparation of interplanetary missions is more complicated task. For example, manned lunar missions, creation and use of lunar bases, conditions of extended stay on the surface of the moon cause a range of new problems and require new approaches to organization and support of such missions [1]. So a significant complication of crew activities and increase in volume of work, connected with installation, maintenance and repair work, routine and dangerous operations are expected.

In this regard, the particular interest lies in the use of anthropomorphic robotic systems for crew support during EVA, IVA and operations on the surface of a planet. Such anthropomorphic robotic crew assistants have a range of advantages in comparison with other robotic constructions. Manipulators of these robots are similar to human hands and can be adapted for number of mission operations, originally planned for the cosmonauts (e.g. commands from various control panels, operations with standard onboard tools and equipment, auxiliary service operations, etc.). In particular, the anthropomorphic robot can be remotely controlled in master-slave mode. This is possible by use of so-called exoskeletons, which allow to transfer motions from a human operator to the robot. The human operator can be a crew member or an operator of the Mission Control Center.

The presence of anthropomorphic robot in the control loop of mission operations leads to the necessity to study the ergatic system “cosmonaut – anthropomorphic robot - professional environment”, as well as to point out its objectives and methods of use in order to increase the effectiveness of implementation of mission tasks. The aim of the study is the optimization of cosmonauts and robot’s activities in space environment, under on-planet conditions and inside the manned spacecraft (of the on-planet complex). The main ergonomic problem of creation and effective applying of such ergatic system lies in coordination of characteristics of this system. The problem can be solved by creation of efficient human- robotic interface, as well as by rational distribution of functions between the elements of the ergatic system “cosmonaut – anthropomorphic robot - professional environment”. Particular ergonomic problems are in optimization of human, technical and environmental influence on the efficiency of the system.

Application areas and versions of appearance for anthropomorphic robotic crew assistants in respect to the intravehicular activity of the crew.

Apparently, the primary ergonomic problem is a rational distribution of functions between the cosmonauts and robotic crew assistants. This problem lies in the selection of tasks (mission operations), which can be entrusted to the robot, and in definition of its rational operational modes.

On the basis of the selection procedure of mission operations, which can be robotized [3], the list of tasks of the crews' professional activities aboard the spacecraft (for example, the ISS), which can be entrusted to robotic assistants, have been defined by an expert way.

1. Maintenance of onboard systems and equipment, housekeeping activity.

1.1. Planned routine operations:

- preventive maintenance of life support systems;
- regular housekeeping activity connected with the ensuring of normal living conditions for the cosmonauts (e.g. cleaning of compartments, cleaning of panels with a vacuum cleaner, cleaning of dust collectors, etc.);
- issuance of one-time commands to turn on/off the equipment at a scheduled time;

Maintaining a database of inventory management system, audit of its compliance with the actual location of objects inside the spacecraft;

- loading/offloading operations, connected with cargo vehicles.

1.2. Unscheduled operations performed remotely by the robotic crew assistant:

- Remote inspection of emergency modules of the manned spacecraft;
- search for fire zones, their location, de-energizing and extinguishing with a fire-extinguisher;
- remote execution of repair work in the emergency modules of manned spacecraft;
- remote operations for conservation of the modules in case of cosmonauts' emergency escape from the station;
- maintenance of performance capability of all onboard systems during their unmanned operation.

2. Support of crew activity:

2.1. Operational support (the "third hand"):

- to bring a tool, equipment;
- to hold a tool, equipment;
- to highlight a working area;
- photo and video recording of the cosmonauts' work for the following transmission of this report to the MCC at a scheduled time;
- recording of a cosmonaut's voice data (results of performed work, comments) for downlinking to the Mission Control Center at a scheduled time.

2.2. Information support:

- Daily cyclogram tracking, reminder of the time of scheduled events;
- voice-guided operations in accordance with onboard documentation;
- providing of supplemental information (text, audio, photo, video) about onboard systems, equipment, location of hardware from the database of inventory management system at a cosmonaut's request;
- providing of intelligent interface between a cosmonaut and onboard systems of the manned spacecraft by using a telemetry information;
- warning of an emergency situation when critical parameters are out of limits.

2.3. Psychological support:

- diagnostics of psychological state of a cosmonaut;
- measurement of a cosmonaut's medical parameters (heart rate, blood pressure, etc.);

correction of psychophysical state of a cosmonaut;

- providing of the cosmonauts' leisure activities.

When substantiating the ergonomic requirements for characteristics of the ergatic system, the following versions of technical appearance of the robot depending on various scenarios of its application were considered.

Version 1. "Stationary version of the robot in a parked position, and controlled only by operator in master-slave mode".

This version can also be operated by an operator of the MCC in master-slave mode.

Version 2. " Stationary version of the robot in a parked position, with a weak artificial intelligence, able to perform some operations remotely".

This version can also be operated in automatic mode as well as in interactive master-slave mode by a cosmonaut or an operator of the MCC.

Version 3. "Mobile robot with a weak artificial intelligence".

This version can also be operated in automatic mode as well as in interactive master-slave mode by a cosmonaut aboard the spacecraft or an operator of the MCC. In all these modes the robot should be provided with the ability to move independently inside the modules of the station following the routs given by an operator.

Version 4 "Mobile robot with an advanced artificial intelligence".

This version of the robot can be used in autonomous (completely automatic) mode with provided ability to move independently inside the modules of the station.

Structure of the ergatic system "cosmonaut – anthropomorphic robot – professional environment"

The structure of the ergatic system "cosmonaut – anthropomorphic robor – professional environment" is on Figure 1.

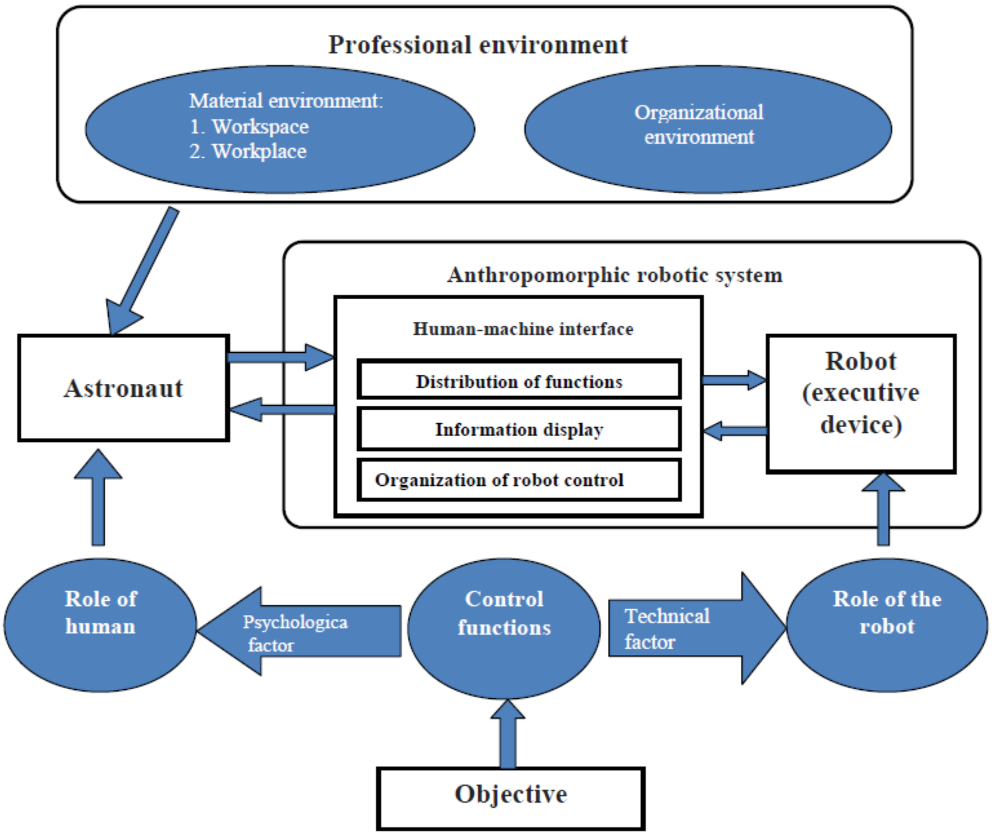


Fig. 1. Structure of the ergatic system "cosmonaut – anthropomorphic robot – professional environment"

The elements of considered ergatic system are: cosmonaut-operator, who represents a complex biological system; anthropomorphic robot, which represents a complex technical system; and professional environment, which covers the cosmonaut-operator, anthropomorphic robot, other technical facilities (systems) and where the cosmonauts' professional activity on operation of anthropomorphic robot is carried out.

Anthropomorphic robotic system (anthropomorphic robot) includes an automated anthropomorphic executive device (robot) and human-machine interface, which allows to operate the robot remotely by a cosmonaut-operator.

Professional environment includes both, material an organizational environments. The first one characterizes a cosmonaut's workplace, the second one – conditions of organization of the cosmonaut's activity at the workplace.

Optimization of influence of psychological and technical factors on the performance of the ergatic system "cosmonaut - anthropomorphic robot – professional environment"

When creating the ergatic system, it is necessary to consider two groups of factors – psychological and technical. The psychological (internal) factors take into account the psychological characteristics of a person. The technical factors are external for the operator and determined by the organization of functioning of the ergatic system.

Optimization of the influence of psychological factors is possible on the basis of selection and training of human operator, who is able to interact with the robot effectively.

Optimization of the influence of technical factors can be achieved through such organization of the system's functioning which maximally takes into consideration the human performance and must be adapted for the efficient operation in space missions (on-planet activity). The scheme of the considered technical factors is shown in Figure 2.

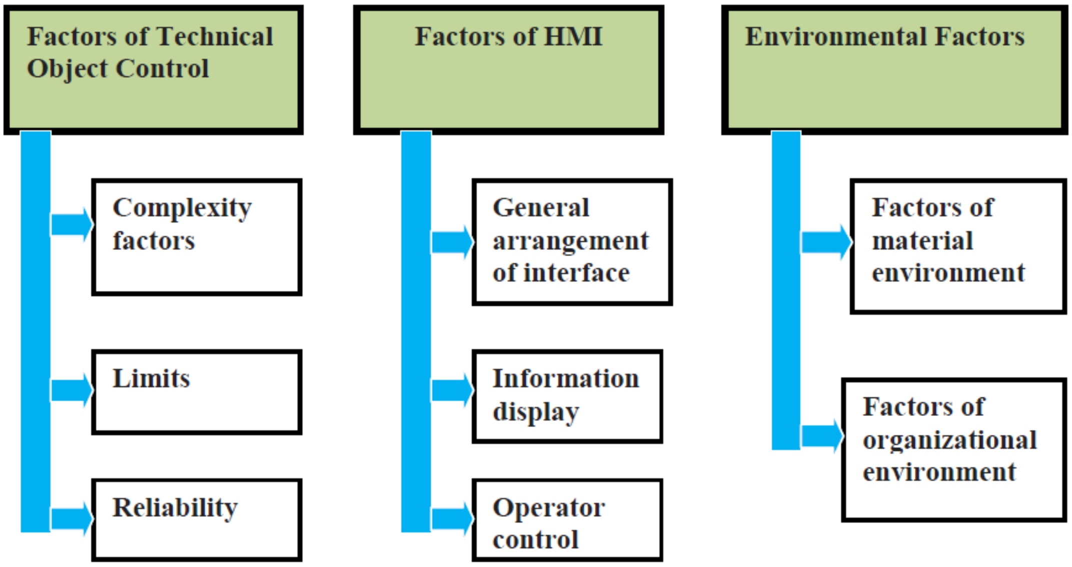


Fig. 2. External technical factors influencing the efficiency of the ergatic system

The technical factors should include factors of the technical control object (robot and performed mission operations), humane-machine interface and the environment.

Quality and efficiency of the ergatic system depend largely on the ideology of the HMI, and, particularly, on the optimal distribution of functions between the cosmonaut-operator and anthropomorphic robot and also on the characteristics of information displays and control devices. Optimization of the influence of the HMI's factors lies in providing of mutual adaptation of requirements for the operation of the HMI and real human performance. In other words, the process of operation should be organized in such a way that its complexity (requirements, assigned to the cosmonaut-operator) correspond to human biological capacity.

Optimization of factors of the professional environment can be achieved through providing of normal life conditions for the cosmonauts as well as high performance and reliability of the robot during its functioning in the interior of the manned spacecraft or in vacuum of outer space, under conditions of weightlessness, on the exterior surface of the spacecraft, on the surface of the Moon (Mars).

Conclusion

The use of robotic crew assistants in the performance of interplanetary missions seems quite attractive and promising. However, the presence of this additional element in the control loop of mission operations leads to the necessity to study the ergatic system "cosmonaut – anthropomorphic robot - professional environment", In order to provide the effective functioning of the ergatic system, the special ergonomic studies must be performed on the stages of creation and application of the robot.

1. Сосюрка Ю.Б., Долгов П.П., Каспранский Р.Р. Базовые подходы к подготовке экипажей лунных экспедиций. Пилотируемые полеты в космос, ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина», № 3(8), 2013, стр. 51-60.
2. Богданов А.А., Кутлубаев И.М., Сычков В.Б. Перспективы создания антропоморфных робототехнических систем для работы в космосе. Пилотируемые полеты в космос, ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина», № 1(3), 2012, стр. 78-84.
3. 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», стр. 219-229.

Ю.В. Лончаков, В.А. Сиволап, И.Г. Сохин

ЭРГОНОМИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ СОЗДАНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ АНТРОПОМОРФНЫХ РОБОТОВ - ПОМОЩНИКОВ ЭКИПАЖЕЙ ПЕРСПЕКТИВНЫХ КОСМИЧЕСКИХ МИССИЙ

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Научно-исследовательский испытательный центр подготовки космонавтов имени Ю.А. Гагарина», Звездный городок
i.sokhin@gctc.ru

Аннотация

В настоящее время широко обсуждаются проблемы создания и применения роботов-помощников экипажей при выполнении перспективных межпланетных полетов. При этом эргономическим аспектам, оказывающим большое влияние на целевую эффективность применения роботов-помощников космонавтами, уделяется недостаточное внимание.

В статье рассматривается разрабатываемый в Центре подготовки космонавтов системный подход к проблеме обоснования эргономических требований к характеристикам эргатической системы (ЭС) «космонавт - антропоморфный робот - профессиональная среда деятельности», основанный на оптимизации влияния человеческих, технических факторов и факторов среды на эффективность функционирования эргатической системы.

Введение

Мировые тенденции показывает, что стратегические перспективы развития пилотируемой космонавтики связаны с обеспечением более эффективного использования низких околоземных орбит, освоением Луны и осуществлением межпланетных полетов (в первую очередь - к Марсу и ближайшим астероидам). По сравнению с подготовкой к выполнению пилотируемых космических полетов вокруг Земли подготовка экипажей межпланетных экспедиций представляет собой новую и более сложную задачу. В частности, рассматриваемые в ближайшей перспективе пилотируемые экспедиции на Луну, создание и использование окололунных и лунных баз, условия длительного пребывания космонавтов на поверхности Луны обуславливают появление целого ряда новых проблем (по сравнению с полетами на низкие околоземные орбиты), требуют новых подходов к принципам организации и обеспечения таких миссий [1]. Предполагается существенное усложнение деятельности экипажей перспективных пилотируемых космических комплексов и увеличение объемов работ, связанных с техническим обслуживанием, выполнением трудоемких монтажно-восстановительных работ, рутинных и опасных операций.

В этой связи особый интерес представляет использование антропоморфных робототехнических систем для поддержки деятельности экипажей, как при их внутрикорабельной деятельности, так и в процессе внекорабельной деятельности, а в перспективе – и при напланетной деятельности. Такие антропоморфные роботы-помощники экипажей (РПЭ) имеют некоторые преимущества по сравнению с другими робототехническими конструкциями при выполнении полетных операций. Антропоморфные РПЭ, манипуляторы которых подобны человеческим рукам, могу быть приспособлены для выполнения ряда полетных операций, которые первоначально были спроектированы для космонавтов (например, выдача команд с различных пультов управления, операции со штатным бортовым инструментом и оборудованием, выполнение вспомогательных сервисных функций «третьей руки» и др.). В частности, можно дистанционно управлять РПЭ в копирующем режиме. Для этого используются так называемые экзоскелеты, позволяющие снимать показатели движений человека-оператора и передавать их антропоморфному роботу [2]. В качестве человека-оператора, управляющего РПЭ, может быть член экипажа или оператор наземного Центра управления полетами.

Вместе с тем, появление РПЭ в контуре управления полетными операциями приводит к необходимости исследований эргатической системы «космонавт - антропоморфный робот - профессиональная среда деятельности», с уточнением задач и способов её использования – в интересах повышения эффективности выполнения полетных задач. Цель исследования ЭС заключается в оптимизации деятельности космонавтов и РПЭ в условиях космического пространства, напланетных условиях или условиях интерьера ПКК (напланетного комплекса). Основная эргономическая проблема создания и эффективного применения такой эргатической системы заключается в согласовании характеристик этой системы. Эта проблема может быть решена, во-первых, построением эффективного человеко-машинного интерфейса, во-вторых, рациональным распределением функций между активными звеньями эргатической системы «космонавт - антропоморфный робот - профессиональная среда деятельности». Частные эргономические проблемы заключаются в оптимизации влияния человеческих, технических факторов и факторов среды на эффективность функционирования системы.

Области применения и варианты технического облика антропоморфных роботов-помощников экипажа применительно к внутрикорабельной деятельности экипажей ПКК

По-видимому, первоочередной эргономической проблемой является рациональное распределение функций между космонавтами и роботами-помощниками. Эта проблема заключается в отборе задач (полетных операций), которые целесообразно возложить на роботов, и определении рациональных режимов их функционирования.

На основании применения методики выбора полетных операций, которые целесообразно роботизировать [3], экспертным способом был определен перечень задач профессиональной деятельности экипажа на борту пилотируемых космических комплексов (на примере МКС), которые могут быть возложены на РПЭ.

1. Техническое обслуживание бортовых систем и аппаратуры, бытовые процедуры.

1.1. Плановые рутинные операции:

- операции профилактического технического обслуживания систем обеспечения жизнедеятельности;
- регулярные бытовые операции, связанные с обеспечением нормальных условий жизнедеятельности космонавтов (например, уборка отсеков и чистка панелей с помощью пылесоса, очистка пылесборников и др.);
- выдача разовых команд на включение/отключение аппаратуры в запланированное время;

поддержание базы данных системы управления инвентаризацией, аудит её соответствия реальному размещению предметов на ПКК;

- разгрузочно-погрузочные работы, связанные с обслуживанием транспортных грузовых кораблей.

1.2. Внеплановые операции, выполняемые дистанционно с помощью РПЭ:

- дистанционная инспекция аварийных модулей ПКК;
- поиск зон возгорания, их локализация, обесточивание и тушение с помощью огнетушителей;
- дистанционное выполнение ремонтно-восстановительных работ в аварийных модулях ПКК;
- дистанционное выполнение операций консервации модулей в случае экстренного аварийного покидания станции экипажем;
- операции поддержания работоспособности бортовых систем ПКК в период их беспилотного функционирования.

2. Поддержка деятельности экипажа ПКК.

2.1. Операционная поддержка (функция «третьей руки»):

- подать инструмент, оборудование;
- поддержать инструмент, оборудование;
- подсветить рабочую зону;
- фото и видео регистрация работ, выполняемых космонавтом, с представлением отчета для последующей передачи в ЦУП в запланированное время;
- регистрация речевой информации космонавта (результаты выполнения работ, комментарии) для последующей передачи в ЦУП в запланированное время.

2.2. Информационная поддержка:

- отслеживание суточной циклограммы работ, напоминание космонавтам о наступлении времени событий, запланированных в суточном плане работ;
- голосовое сопровождение операций в соответствии с бортовой документацией;
- выдача по запросам космонавта справочной информации (текст, аудио, фото, видео) о бортовых системах, аппаратуре, местах размещения оборудования из базы данных системы управления инвентаризацией;
- обеспечение интеллектуального интерфейса между космонавтом и бортовыми системами ПКК, используя телеметрическую информацию;
- предупреждение о возникновении нештатных ситуаций при выходе критических параметров за допустимые пределы.

2.3. Психологическая поддержка:

- диагностика психофизиологического состояния космонавта;
- измерение медицинских параметров космонавта (ЧСС, артериальное давление и др.);

коррекция психофизиологического состояния космонавта;

- обеспечение досуга космонавтов в личное свободное время.

При обосновании эргономических требований к характеристикам ЭС рассматривались следующие варианты технического облика РПЭ, полученные на основе анализа возможных сценариев его применения.

Вариант 1. «Стационарный вариант робота, находящегося в припаркованном положении и управляемого оператором только в копирующем режиме».

Этот вариант РПЭ может также использоваться под управлением оператора ЦУП в интерактивном копирующем режиме.

Вариант 2. «Стационарный вариант робота со слабым искусственным интеллектом, находящегося в припаркованном положении и способного выполнять часть операций в автоматическом режиме».

Этот вариант РПЭ может использоваться как в автоматическом режиме, так и в интерактивном копирующем режиме под управлением оператора ЦУП или космонавта с борта ПКК.

Вариант 3. «Мобильный робот со слабым искусственным интеллектом».

Этот вариант РПЭ может использоваться при реализации, как в автоматическом режиме, так и в интерактивном копирующем режиме управления оператором ЦУП или космонавтом с борта ПКК. В любом из этих режимов должна быть обеспечена способность робота самостоятельно передвигаться по заданному оператором маршруту внутри модулей станции.

Вариант 4 «Мобильный робот с развитым искусственным интеллектом».

Этот вариант РПЭ может использоваться в автономном (полностью автоматическом) режиме с обеспечением способности робота самостоятельно передвигаться внутри модулей станции.

Структура эргатической системы «космонавт - антропоморфный робот - профессиональная среда деятельности»

Структура ЭС «космонавт - антропоморфный робот - профессиональная среда деятельности» представлена на Рис. 1.

Рис. 1. Структура ЭС «космонавт - антропоморфный робот - профессиональная среда деятельности»

Компонентами рассматриваемой ЭС являются космонавт-оператор, представляющий собой сложную биологическую систему, 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 космонавта-оператора по управлению антропоморфным роботом.

Антропоморфная робототехническая система (антропоморфный робот) включает в себя автоматизированное антропоморфное исполнительное устройство (робот) и человеко-машинный интерфейс (ЧМИ), представляющий собой интеллектуальную систему взаимодействия космонавта-оператора с роботом. ЧМИ позволяет космонавту-оператору осуществлять взаимодействие и управлять роботом на значительном удалении от места проведения работ, дистанционно.

Профессиональная среда деятельности включает в себя материальную и организационную среды. Первая из них характеризует рабочее место космонавта, а вторая – условия организации деятельности космонавта на рабочем месте.

Оптимизация влияния психологических и технических факторов на эффективность функционирования эргатической системы «космонавт - антропоморфный робот - профессиональная среда деятельности»

При создании ЭС необходимо учитывать две группы факторов – психологические и технические. Психологические (внутренние) факторы учитывают психофизиологические особенности человека. Технические факторы, являются внешними по отношению к человеку-оператору и определяются организацией процесса функционирования ЭС.

Оптимизация влияния психологических факторов возможна на основе отбора и подготовки человека-оператора, способного эффективно взаимодействовать с РПЭ.

Оптимизация влияния технических факторов достигается за счет такой организации процесса функционирования ЭС, которая максимально учитывает возможности человека и приспособлена к эффективному функционированию в космическом полете (напланетной деятельности). Структура рассматриваемых технических факторов представлена на Рис. 2.

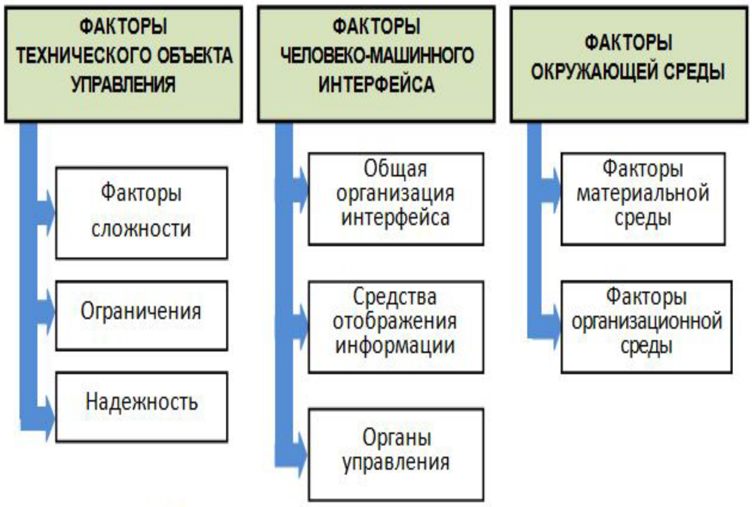


Рис. 2. Внешние технические факторы, влияющие на эффективность ЭС

К техническим факторам следует относить факторы технического объекта управления (робота и выполняемой полетной операции), человеко-машинного интерфейса и окружающей среды.

Качество и эффективность функционирования ЭС во многом зависит от идеологии построения ЧМИ, и в частности – от оптимальности распределения функций между космонавтом-оператором и антропоморфным роботом, от характеристик средств отображения информации и органов управления. Оптимизация влияния факторов ЧМИ заключается в обеспечении взаимной адаптации требований к управлению СЧМ и реальных возможностей и способностей человека, организации процесса управления таким образом, чтобы его сложность (т.е. требования, предъявляемые к космонавту-оператору) соответствовали биологическим возможностям человека.

Оптимизация влияния факторов профессиональной среды достигается за счёт обеспечения человеку условий нормальной жизнедеятельности, удобства и комфорта, а РПЭ – высокой производительности и надёжности в процессе функционирования в условиях интерьера ПКК или космического вакуума, невесомости или низкой весомости, на экстерьере ПКК или на поверхности Луны (Марса).

Заключение

Применение антропоморфных роботов-помощников экипажей при выполнении межпланетных полетов выглядит достаточно привлекательным и перспективным. Вместе с тем, появление в контуре управления полетной операции дополнительного элемента - РПЭ – приводит к появлению боле сложной эргатической системы «космонавт - антропоморфный робот - профессиональная среда деятельности». Для обеспечения эффективного функционирования данной ЭС необходимо проводить специальные эргономические исследования на этапах создания и применения РПЭ.

1. Сосюрка Ю.Б., Долгов П.П., Каспранский Р.Р. Базовые подходы к подготовке экипажей лунных экспедиций. Пилотируемые полеты в космос, ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина», № 3(8), 2013, стр. 51-60.
2. Богданов А.А., Кутлубаев И.М., Сычков В.Б. Перспективы создания антропоморфных робототехнических систем для работы в космосе. Пилотируемые полеты в космос, ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина», № 1(3), 2012, стр. 78-84.

3. 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», стр. 219-229.

S. Seredin, S. Lysyj, V. Semenov, O. Abalikhin, O. Emeldyashecheva, V. Fomina, A. Kondratiev, A. Gradovcev, V. Konyshev

SPACE ROBOTICS FOR SUPPORT OF ORBITAL AND ON-PLANET CREW ACTIVITY

FSUE TSNIImash, Korolev city, Moscow region;
RTC, Saint-Petersburg, Russia

С.В. Середин, С.Р. Лысый, В.В. Семенов, О.Ю. Абалихин, О.В. Емельдящева, В.В. Фомина, А.С. Кондратьев, А.А. Градовцев, В.А. Конышев

КОСМИЧЕСКИЕ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЭКИПАЖА ОРБИТАЛЬНЫХ И НАПЛАНЕТНЫХ МОДУЛЕЙ

Федеральное государственное унитарное предприятие
«Центральный научно-исследовательский институт машиностроения», г. Королёв;
ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург
corp@tsniimash.ru

Имеющийся опыт создания и применения робототехнических систем (РТС) космического назначения показывает, что они являются мощным и уникальным инструментом в решении задач исследования космического пространства, создания КА и их эксплуатации. Несомненно, роль космической робототехники будет непрерывно возрастать в связи с необходимостью строительства в условиях космоса и автоматизированного обслуживания глобальных систем связи, навигации и наблюдения, постоянно действующих пилотируемых и посещаемых орбитальных станций, а также баз на Луне и планетах Солнечной системы. В зарубежных странах данному направлению уделяется огромное внимание. В США, Европе, Японии, Китае ведутся активные работы по разработке робототехнических систем космического назначения. Там роботизированные системы рассматриваются как один из важнейших атрибутов космической деятельности. В России, несмотря на некоторое отставание в высокотехнологичном секторе от зарубежных стран, также имеются некоторые достижения в области технологий космического роботостроения.

ФГУП ЦНИИмаш в соответствии с Федеральной космической программой 2006-2015 гг. проводит ряд НИОКР в кооперации с ведущими предприятиями космической отрасли и коммерческими организациями по разработке робототехнических систем, в том числе антропоморфного типа, для пилотируемых и автоматических космических комплексов с целью автоматизации работ при внутри- и внекорабельной деятельности космонавтов, а также выполнения операций стыковки и сборки в космосе крупногабаритных конструкций. В частности, с 2011 года проводятся научно-исследовательские работы по исследованию возможностей использования дистанционно-управляемого антропоморфного робота для операционной поддержки деятельности космонавтов.

В настоящий момент на предприятии активно ведутся работы по разработке эскизного проекта и макетного образца робототехнического комплекса при внекорабельной деятельности (Рис. 1).

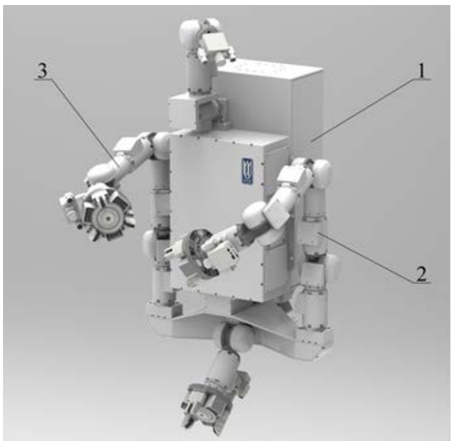


Рис. 1. Внешний вид робототехнического комплекса при внекорабельной деятельности

Новизна данной работы состоит в разработке мобильной РТС для выполнения технологических операций на внешней поверхности космических аппаратов и поддержки экипажа при внекорабельной деятельности. Обзор современных робототехнических систем космического назначения в России и за рубежом показывает, что эта задача является новой, и на сегодняшний день в нашей стране таких разработок не проводилось.

Наиболее близкими к разрабатываемой РТС по назначению, условиям эксплуатации и конструктивному исполнению являются канадский робот Dextre и европейский робот Eurobot. В целом можно сказать, что при схожих задачах (обслуживание внешней поверхности МПК/МКС), РТС обладает меньшей массой и большей точностью при возможности самостоятельно перемещаться по поручням и такелажным элементам внешней поверхности КА.

Также в рамках выполняемой в ФГУП ЦНИИмашОКР разрабатывается робототехническая подсистема технического зрения, управления и связи (ПТЗУС), предназначенная для выполнения технологических операций на внешней поверхности космических аппаратов и поддержки экипажа при внекорабельной деятельности в части управления, отображения, обработки информации, связи, формирования снимков внешней поверхности модулей, пилотируемых комплексов.

ПТЗУС представляет собой КА, предназначенный для контроля технического состояния орбитальных космических станций и космических объектов, путем видео фиксации внешних поверхностей, предварительной обработки, сжатия и передачи по каналам связи на пульт управления, расположенный на орбитальной станции.

В настоящее время текущие задачи по обслуживанию и контролю, включая визуальный контроль КА, осуществляется в основном на МКС при помощи телекамер и непосредственного визуального анализа космонавтами. Визуальный контроль осуществляется при множестве технологических операций, осуществляемых в космическом пространстве как в автоматическом, так и в ручном режимах. Задачи, решаемые в рамках существующих обитаемых, либо пилотируемых средств, в основном можно условно разделить на задачи, решаемые космонавтами, осуществляющими выход в открытый космос и на задачи, решаемые при помощи роботизированных или автоматизированных систем. Причем визуальный контроль либо контроль средствами технического зрения является ключевой технологией обеспечения безопасного проведения любых операций.

В большинстве случаев внекорабельная деятельность заключается в проведении сервисных и наладочных работ на МКС по электропитанию, связи, обеспечению стыковочной деятельности, подключению нового оборудования (например, камер, антенных решеток и проч.) а также демонтажу и замене отработавших элементов. Кроме того, существует множество других задач, разной степени сложности, например, протирка внешней стороны иллюминатора или взятие биологических проб с поверхности. Отдельно стоит сказать о задачах мониторинга поверхности конструктивных элементов МКС, выполнение которых также осуществляется путем визуального контроля в ходе плановых и внеплановых проверок.

Анализируя продолжительность работы космонавтов в открытом космосе можно сказать, что типичное время производства работ составляет не менее 6 часов. Однако существуют и короткие выходы, продолжительностью 1-2 часа. Стоит отметить, что подготовительные работы перед каждым выходом, в не зависимости от времени пребывания в космосе, могут занимать до 12 часов.

Очевидно, что каждый выход в открытый космос является сложной технологической операцией и несет серьезные риски для жизни и здоровья космонавтов и функционирования станции в целом. Кроме того, речь идет о существенных временных и материальных затратах. Применение автоматизированных модулей, способных заменить в некоторых случаях космонавтов, позволило бы существенно снизить риски для жизни и здоровья экипажа, возможные риски связанные с «человеческим фактором», а также, сократить затраты материальных и энергетических ресурсов. В первую очередь это касается задач обследования поверхности. Кроме того, применение таких модулей также было бы крайне полезным при проведении операций в открытом космосе с точки зрения визуальной поддержки при помощи телекамер, установленных на автоматизированном модуле, либо при помощи автономных средств технического зрения.

Сегодня производимые операции в космосе записываются и контролируются системами видеонаблюдения, закрепленными на скафандре космонавтов, однако зачастую возникает необходимость контроля участков, не находящихся в непосредственном поле зрения космонавта. В таком случае прибегают к видеокамерам, установленным на элементах конструкции МКС и механических роботизированных системах. Разумеется, число и расположение таких видеокамер является достаточно ограниченным. В некоторых случаях отсутствие визуального контроля с нужных направлений может оказаться весьма существенным, т.к. при использовании фиксированных видеокамер помимо всего прочего может возникать проблема солнечной засветки или, наоборот, затенения. В таких случаях мобильный, перемещаемый в пространстве роботизированный модуль с функцией видеоконтроля может оказаться весьма полезным.

Внешний вид конструкции разрабатываемой ПТЗУС представлен на Рис. 2.

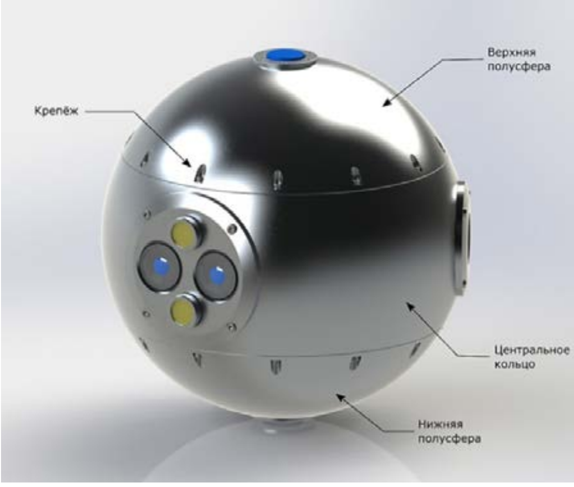


Рис. 2. Конструкция ПТЗУС, разрабатываемой в ФГУП ЦНИИмаш

Помимо этих разработок, также в ФГУП ЦНИИмаш ведутся работы по созданию антропоморфного робота (АРТС) для поддержки внутрикорабельной деятельности, внешний вид которого показан на Рис. 3.

Рис. 3. Внешний вид АРТС

Данного робота предполагается использовать на борту станции для автоматического выполнения следующих операций:

- операции профилактического технического обслуживания комплекса систем обеспечения жизнедеятельности;
- регулярные бытовые операции, связанные с обеспечением нормальных условий жизнедеятельности космонавтов (например, уборка отсеков и чистка панелей с помощью пылесоса, очистка пылесборников и др.);
- выдача разовых команд на включение/отключение аппаратуры в запланированное время;
- поддержание базы данных системы управления инвентаризацией, аудит её соответствия реальному размещению предметов на пилотируемом космическом комплексе;
- разгрузочно-погрузочные работы, связанные с обслуживанием транспортных грузовых кораблей.
- дистанционная инспекция аварийных модулей пилотируемом космическом комплексе;
- поиск зон возгорания, их локализация, обесточивание и тушение с помощью огнетушителей;
- дистанционное выполнение ремонтно-восстановительных работ в аварийных модулях пилотируемого космического комплекса;
- дистанционное выполнение операций консервации модулей в случае экстренного аварийного покидания станции экипажем;

– операции поддержания работоспособности бортовых систем пилотируемого космического комплекса в период их беспилотного функционирования.
– операционная поддержка (функция «третьей руки»);
– фото и видео регистрация работ, выполняемых космонавтом, с представлением отчета для последующей передачи в ЦУП в запланированное время;
– регистрация речевой информации космонавта (результаты выполнения работ, комментарии) для последующей передачи в ЦУП в запланированное время.
– информационная поддержка экипажа;
– психологическая поддержка.

Следует отметить, что создание таких перспективных космических систем требует развития первоочередных ключевых технологий роботостроения:
– технологии создания мехатронных узлов (шарниров), многозвенных манипуляторов, включая антропоморфные манипуляционные системы, обеспечивающие длительное их функционирование в экстремальных условиях, в том числе в условиях космического пространства;
– технологии создания мехатронно-модульных робототехнических систем, имеющих возможность модификации собственной структуры;
– технологии создания перспективных сенсорных систем и систем технического зрения;
– технологии дистанционного управления космическими робототехническими комплексами с наличием задержек распространения сигналов в каналах связи;
– технологии адаптивного управления робототехническими системами с использованием интеллектуальных методов: экспертных систем, нейронных сетей, нечеткой логики и т.д.;
– технологии группового управления робототехническими системами;
– технологии создания развитого человеко-машинного интерфейса;
– технологии создания перспективных малогабаритных систем энергообеспечения робототехнических комплексов;
– технологии виртуального моделирования и наземной отработки робототехнических систем;
– технологии обработки информации и программное обеспечение для встраиваемых систем управления, контроля и идентификации робототехнических систем;
– технологии создания и экспериментальные образцы специальных инструментов и сменной оснастки с необходимыми элементами крепления.

Внедрение робототехнических систем в космическую сферу позволит повысить процент научно-технической и исследовательской деятельности космонавтов за счет сокращения объема рутинных работ, выполняемых экипажами КА при внекорабельной деятельности и внутри гермоотсеков, повысить безопасность выполняемых операций, расширить перечень робототехнических операций, обеспечивающих обнаружение и ликвидацию нештатных и аварийных ситуаций, а также операций по обслуживанию космонавтов во время внутри- и внекорабельной деятельности.

O. Kovalev, Yu. Akulshin, A. Pryadko

THE DEVELOPMENT OF BIONIC PROSTHESIS

Peter The Great Saint-Petersburg Polytechnic University,
RTC, Saint-Petersburg, Russia
kovalev.oleg.o@gmail.com, acul08@gmail.com, pryadko@rtc.ru

О.О. Ковалев, Ю.Д. Акульшин, А.И. Прядко

РАЗРАБОТКА БИОНИЧЕСКОГО ПРОТЕЗА РУКИ

СПбПУ, НИЛ НМСТ ОНТИ, ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург,
kovalev.oleg.o@gmail.com, acul08@gmail.com, pryadko@rtc.ru

Введение

Основными органами человеческого организма, позволяющими воздействовать на окружающую среду, являются руки. Утрата одной конечности приводит к большому дискомфорту в ведении повседневной жизни. Утрата обеих конечностей делает человека не дееспособным. В связи с этим, задача по возврату утраченной конечности представляет большую актуальность. При современном развитии науки и техники наиболее возможным вариантом представляется создание электромеханических протезов, по внешнему виду и функционалу походящих на природные конечности.

Идея создания электромеханических бионических протезов не нова и на данный момент ряд крупных европейских и американских компаний выпускает их массово, а также проводят широкие исследования с целью их усовершенствования [1]. Одним из наиболее известных и продвинутых представителей данной области является компания TouchBionics [2]. Так же активно ведутся разработки для военных приложений, например, под руководством американского агентства по военным разработкам (DARPA). Главный недостаток выпускаемых и разрабатываемых протезов заключается в их большой стоимости (миллионы рублей) и недоступности для пациентов РФ (настройка системы управления индивидуальна и требует присутствия пациента). Завершенные отечественные разработки в данном направлении отсутствуют.

Целью данной работы является разработка бионического протеза, позволяющего частично возмещать функции утраченной конечности; организация системы управления на основе регистрации мышечной активности; организация системы управления на основе определения ориентации протеза в пространстве. Используются технологии 3D печати и передовые достижения технологий МЭМС.

Механика руки

Степень ампутации руки может быть различной: пальцы, часть кисти, кисть, часть предплечья и т. д. Для охвата всех возможных случаев наиболее эффективным вариантом является создание модульной конструкции руки. То есть оснащение каждой секции руки (пальца, кисти, предплечья) отдельной системой двигателей. Тогда в зависимости от вида ампутации, протез можно собирать из готовых модулей. Также это повышает ремонтопригодность протеза. Данному пути следует компания TouchBionics [1]. Данный путь обладает рядом минусов, он сопряжен со сложностями в изготовлении механики и большими габаритами кисти (это создает проблему в случае протезирования детской руки). Альтернативный путь, разработка линейки протезов в зависимости от вида ампутации и возраста пациента, с проработкой механики для каждого конкретного случая. Например, в случае ампутации кисти и части предплечья наиболее эффективно располагать двигатели в предплечье, а не в ладони, как в случае модульности конструкции. Это позволит установить более мощные двигатели и сохранить натуральные габариты ладони.

Основными условиями, налагаемыми на механику протеза, являются: независимое движение пальцев (сгибание/разгибание), возможность взятия как крупногабаритных (чашка), так и маленьких предметов (электронная карточка, монета), возможность совершения вращательного движения кисти, срок работы без подзарядки должен составлять не менее 12ти часов, рука должна иметь природоподобный вид.

В данной работе разработан прототип, представленный на Рис. 1. Прототип обладает 6-ю степенями свободы: каждый палец сгибается/разгибается независимо от остальных, реализована вращательная степень свободы кисти с предплечьем вокруг крепления гильзы к руке пациента (деталь синего цвета, рисунок 1).

Пальцы приводятся в движение посредствам сервомашинок Impact IS45MGD (момент на валу 10кгс/см, скорость поворота вала на 60 градусов равна 0.08 с). Передача усилия с серводвигателя на палец осуществляется посредством тяговых нитей, крепящихся одним концом к кончику пальца, другим к валу двигателя. Проложено по 2 тяги на палец (одна работает на сгибание, вторая на разгибание). При вращении двигателя в одну сторону происходит намотка первой нити и разматывание второй, в результате чего происходит сгибание пальца, при вращении в противоположную сторону аналогично происходит разгибание. В качестве тяг использована плетеная нить из высокомолекулярного полиэтилена высокой плотности (Dyneema) диаметром 0.5 мм и усилием на разрыв 56 кг. Для снижения трения нитей о корпус руки, проложены канальцы из фторопласта, внутри которых проведена нить. Двигатели размещены согласно рисунку 1.

Рука изготовлена с использованием технологии 3D печати. Ладонь и облицовочный каркас выполнены из пластика T-Glass (полиэтилентерефталат гликоль - модифицированный, прочность на разрыв 55-75 Н / мм^2). Несущий каркас, к которому крепятся двигатели, выполнен из 2 мм алюминиевых листов.

Управление двигателями осуществляется по средствам микроконтроллера Arduino Nano 3.0.

Для оптимизации энергопотребления реализован режим работы руки, при котором происходит полное отключение двигателей после совершения движения. Удержание предмета осуществляется за счет трения в редукторе мотора и его достаточно для удержания легких предметов (смартфон).

Питание осуществляется посредствам внешнего блока, состоящего из LiPol аккумулятора на 2.2мА/ч (7.4В, 30С), двух стабилизаторов на 6В 3А, вентилятора для охлаждения стабилизаторов и самовосстанавливающегося предохранителя на 9А.

Рис. 1. Разработанный прототип протеза

Система управления на основе акселерометра и гироскопа

Управление протезом осуществляется при помощи 6-ти осевого датчика (3х осевой акселерометр + 3х осевой гироскоп), вмонтированного в корпус руки. Принцип управления следующий: при помощи алгоритма DCM []. происходит определение наклона руки относительно линии горизонта (тангаж) и угла поворота вокруг собственной оси (крен). Отсчет ведется относительно начального положения руки (в момент включения). Если тангаж положителен – рука производит хватательное движение. Если тангаж имеет отрицательное значение, то рука разжимается. Крен можно использовать для совершения вращательного движении, например, при отведении локтя в право или влево будет происходит вращение руки по часовой или против часовой стрелки. Также для управления можно независимо использовать акселерометр. Например, при резком и коротком движении вниз, рука будет совершать хватательное движение, при аналогичном движении вверх – будет разжиматься.

На практике был применен только первый из описанных методов (управление по тангажу). Результат оказался положительным, пациент смог совершать манипуляции с предметами (использовать протез для удержания предметов).

Стоит отметить, что предложенный метод не инвазивный, не требует контакта с кожей пациента, прост в обучении пациентом. Главный и очевидный минус метода – невозможность совершения движения при произвольном положении протеза.

Система управления на основе МИО датчиков

Для полноценного функционирования протеза необходимо, чтобы он управлялся пациентом интуитивно, без совершения сторонних манипуляций. Наиболее перспективным, неинвазивным способом является управление посредствам регистрации активности сохранившихся мышц.

Для регистрации мышечной активности используются датчики электрического потенциала EPIC Sensors [5], обладающие следующими характеристиками: материал электрода AgCl, площадь ~1 см^2, для получения сигнала достаточно сухого контакта с кожей. Конструкция данных датчиков такова, что усилитель расположен непосредственно вблизи электрода, что значительно повышает помехоустойчивость системы. Принципиальная схема устройства датчика приведена на рисунке 2.

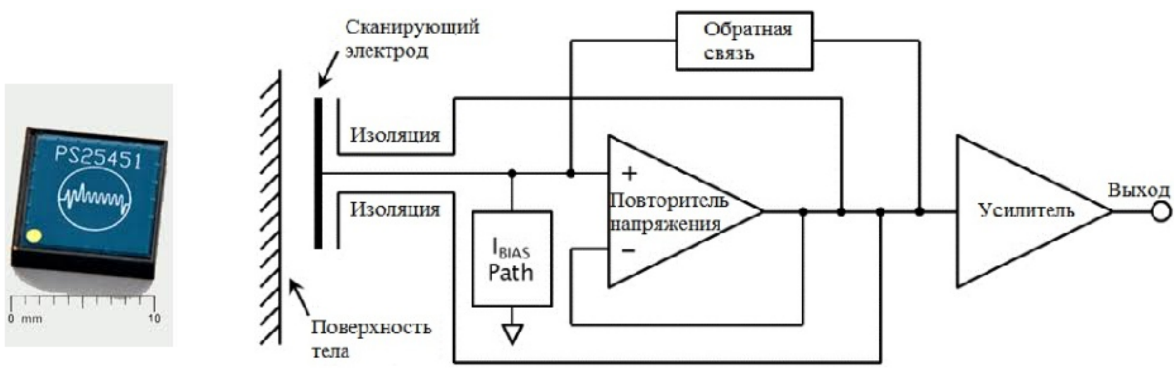


Рис. 2. Датчик электрического потенциала. Схема датчика

Датчик помещен в корпус, покрытый слоем проводящего материала (алюминиевая фольга) с целью уменьшения помех, создаваемых окружающими прибор источниками электрического поля (Рис. 3). Для изготовления корпуса использована технология быстрого прототипирования.

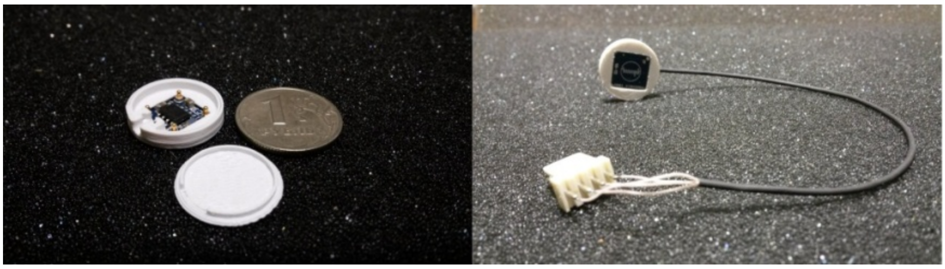


Рис. 3: Датчик электрического потенциала в корпусе

Для сбора данных используется следующая система: регистрируемые сигналы от измерительных каналов поступают на модуль сбора и обработки E14-140. Модуль сбора данных обеспечивает преобразование поступающей от блока усилителей аналоговой информации в цифровую форму. Устройство сбора данных подключается к персональному компьютеру по USB порту. Программа Power Graph 3.3 позволяет выбрать необходимую частоту и объем сбора данных, выполнить необходимую фильтрацию и нормирование сигнала, найти спектральные и корреляционные характеристики.

Выделение необходимого сигнала из потока непрерывно поступающих данных представляет собой отдельную и довольно сложную задачу. Основная проблема заключается в отделении исследуемого сигнала от шумов в режиме реального времени, а также сопоставление получаемых сигналов с вызывающими их сокращениями мышц или мозговой активностью [3].

Традиционные методы фильтрации сигналов включают в себя метод интегральных квадратов, абсолютных величин и нулей [4]. Данные методы удобны с вычислительной точки зрения и позволяют выделять исследуемые сигналы. Недостатком данных методов является то, что при одном и том же сокращении мышц, получаемый сигнал сильно зависит от скорости и силы сжатия. Данная проблема решается путем использования нескольких датчиков электрического потенциала.

В данной работе собрана система, позволяющая регистрировать слабые изменения электрического поля вблизи поверхности сенсоров. В качестве используемого датчика выбран датчик электрического потенциала PS25401A [5]. Проведен ряд тестов по проверке работы системы (реакции на изменение электрического поля вблизи поверхности датчиков). Проведен обзор существующих методов фильтрации сигналов.

Результаты

В результате работы разработан прототип электромеханического протеза для девочки в возрасте 15-ти лет, у которой с детства атрофирована правая рука ниже локтя (протезированию подлежит ладонь и 2/3 предплечья). Предложена система управления на основе регистрации ориентации и динамики протеза в пространстве. Собрана электромеханическая схема регистрации мышечной активности. Проведено медицинское обследование руки девочки (институт нейрохирургии имени Поленова), по результатам которого представляется возможным управление протезом посредствам регистрации мышечной активности сохранившихся мышц (отвечающих за сгибание/разгибание и вращение кисти).

1. Joseph T. Belter, Jacob L. Segil, Aaron M. Dollar, Richard F. Weir. Mechanical design and performance specifications of anthropomorphic prosthetic hands: A review. // Journal of Rehabilitation Research & Development. 2013. P. 599-618.
2. Christine Connolly. Prosthetic hands from Touch Bionics. // Industrial Robot. 2008. P 290-293.
3. Xueyan Tang, Yunhui Liu, Congyi Lv and Dong Sun. Hand Motion Classification Using a Multi-Channel Surface Electromyography Sensors. // Sensors. 2012. P. 1130-1147.
4. М. Г. Серебренников, А. А. Первозванский. Выявление скрытых периодичностей. // Физматлит, 1965 год.
5. C J Harland, T D Clark, N S Peters, M J Everitt and P B Stiffell. A compact electric potential sensor array for the acquisition and reconstruction of the 7-lead electrocardiogram without electrical charge contact to the skin. // Physiological Measurement, 26 (6). 2005. P. 939-950.

S.V. Manko, S.A.K. Diane, A.K. Novoselsky

A PROTOTYPE OF MULTI-AGENT ROBOTIC SYSTEM BASED ON KUKA YOUBOT PLATFORM

MIREA, Moscow, Russia
cpd@mirea.ru, sekoudiane1990@gmail.com, novosselski@gmail.com

Introduction

Planning of appropriate actions for a range of applications in multi-agent robotic systems (MARS) is based on the staged analysis of task execution scenario. Corresponding scenario model is constructed as a network of typical finite state machines, which state and structure of relationships reflect an order and an implementation stage of required technological operations. Detection of actions available for execution is carried out in accordance with the completion of the previous ones (Fig. 1), providing an evident way to form tasks for intelligent autonomous robots operating in the multi-agent system [1].

A typical technological operation element, as a part of the task scenario execution model, can be represented in the form of finite automata:

$$K^O = \{ U^O, X^O, Y^O, f^O, h^O \}, \quad (1)$$

where

$U^O = (u_0^O, u_1^O, u_2^O)$ is an input alphabet;

$X^O = (x_0^O, x_1^O, x_2^O)$ is an alphabet of task states;

$Y^O = (y_0^O, y_1^O, y_2^O)$ is an output alphabet, as described in Table 1.

f^O, h^O are state-transition and output functions, defined by the diagram in Fig. 2.

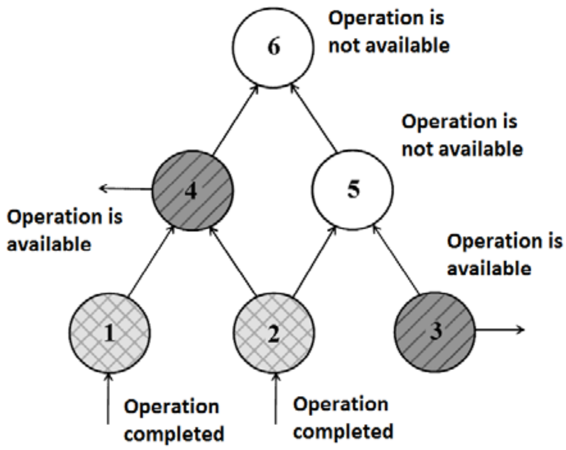


Fig. 1. Group task execution scenario

Table 1. Finite state machine`s alphabet in the model of technological operation execution

Input alphabet	Set of states	Output alphabet
u_0^O - input signal of non-finished operations prior to this	x_0^O - «operation not finished» state	y_0^O - output signal confirming that the operation is in a “non-finished” state
u_1^O - input signal of absence of non-finished operations prior to this	x_1^O - "operation is transferred for execution" state	y_1^O - output signal confirming that transaction is submitted for execution
u_2^O - input signal of completion of the particular operation	x_2^O - «operation finished» state	y_2^O - output signal confirming that the operation is executed

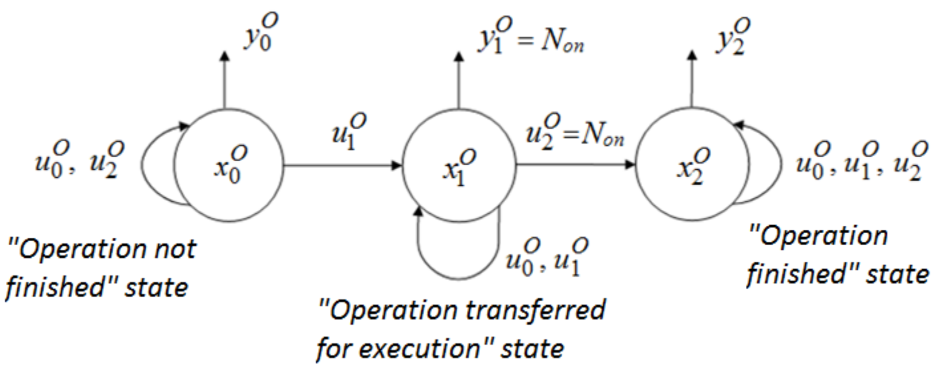


Fig. 2. Transition diagram of the automaton
that controls the technological operation in the group scenario

In general, the change in the status of technological operations is based on interpretation of the data received from autonomous agents. The obtained information on task completion enables updating the state of the scenario model used for scheduling tasks. At the same time, labeling scenario graph nodes based on their status makes possible graphical representation of task execution process on the monitor of the operator.

Research Laboratory

The above approach to planning actions in MARS has been successfully tested via computer simulation [1,2]. The final validation of results was made possible with the commissioning of the MIREA research laboratory for prototyping and full-scale modeling of promising types of autonomous robots and multi-agent robotic systems (Fig. 3).

The structure of the research laboratory includes: two robotic manipulator KUKA IIWA 7 R800; two high-speed high-precision robotic manipulators Galileo; two multicopters MK-MIREA-T; five KUKA youBot mobile robots [3]; 16 CCTV cameras to monitor robot movements.

Рис. 3. MIREA Research Laboratory

KUKA you Botonboard control system is running with the 1700 MHz Intel Atom processor. Available RAM is 2 GB. An operating system installed on robot is Ubuntu 12.04. The platform is also equipped with a USB-connector for tethering with the information-measuring devices. Thus, the sensor equipment of the robot includes the following hardware:

- laser rangefinder Hokuyo URG-04LX-UG01 (measuring range 5.6m; scanning sector 240°, resolution: 0.36°, scanning speed 100ms/scan, 50x50x70mm dimensions, weight 160g, 500 mA current consumption, 5V supply voltage, interface USB 2.0);

- video sensor Asus XTION PRO LIVE with infrared depth sensor (58° horizontal FOV, 45° vertical FOV, resolution of 1280x1024 pixels in video mode and 640x480 in the mode of measuring the depth of scene);

- OmniTIK UPA-5HnD router –an all-weather access pointwith dual-polarization antennas to operate in the mode ofMESHnetwork (has510/100 Ethernet ports,a built-in400mW5GHz802.11a/nradio module that provides the ability to connect with compatible transceivers on a distance up to3 km radius).

Robot actuators are a 5-link KUKA arm with pinch-grasp and 4-wheel drive base with omni-directional wheels (torque 82 Nm). The weight of the robot is 20 kg with 20 kg load capacity. Depending on the installation the robot can be equipped with either one or two manipulators.

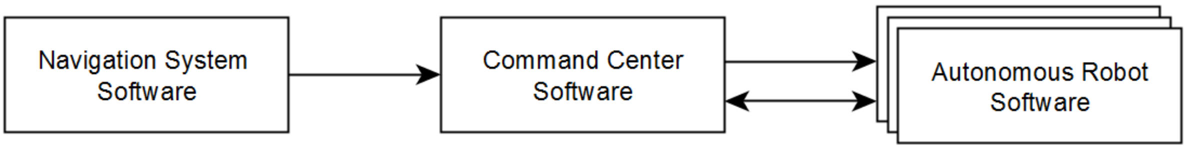


Рис. 4. Software structure of MARS prototype model.

Along with MIREA research laboratory hardware, its integral part is software, responsible for control of robotic agents as well as for gathering and generalization of information about their states. A block diagram of the software solution providing the functionality of MARS prototype is shown in Fig.4.

Command Center Software (CCS) solves the problem of the command generation for different levels of KUKA youBot control system in manual and automatic mode. The automated decision-making is based on a comprehensive analysis of the incoming information about the location of robotic agents, the nature and status of implementation of their assigned applications.

As a result of generalization of diverse sensory information the command center forms the model of MARS operating environment, including information on the position and orientation of robotic agents, as well as the location of target objects [4].

CCS user interface is shown in Figure 5. The application window contains 5 functionally identical graphical tabs for robotic agents individual control, as well as a group control tab.

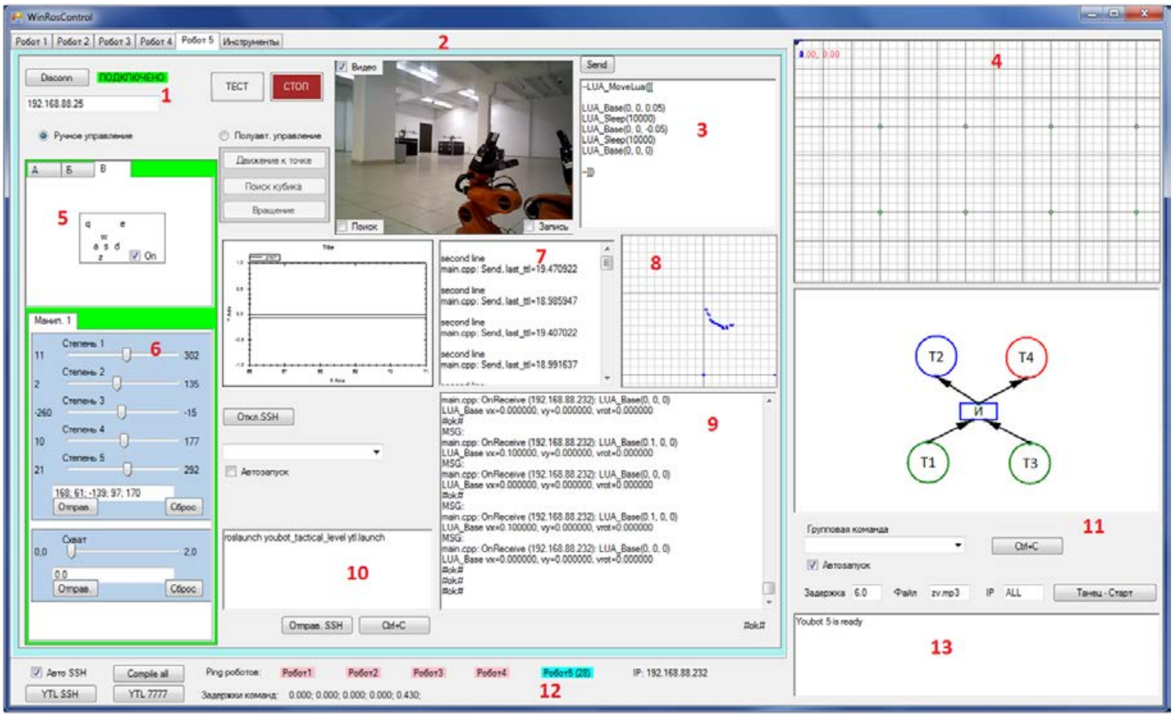


Fig. 5. Command Center Software User Interface

The user interface includes the following groups of graphical controls:

1. The TCP connection setting area for exchanging information with autonomous robot software;
2. The display area for the video from the onboard camera of the robot;
3. The area of editing and sending macro commands (in Lua programming language) to be executed at the tactical level of robot control system;
4. The area displaying locations of robots and other information aboutMARS environment model;
5. Tools for manual control of mobile robot platform;
6. Tools for manual control of robot manipulator(s);
7. The information display area about commands execution(in the modes of the semi-automatic and automatic robot control);
8. The display area for the data from the scanning lidar about the obstacles in front of the robot;
9. The terminal of the operating system installed on the robot (displayed using SSH-connection);
10. The input area for single robot onboard operating system commands;
11. The region of selection and sending predefined group commands to robots constituting MARS;
12. The region with indicators of connection with the robots and the level of onboard battery;
13. The notification area on the status of robotic agents initialization.

Autonomous robot software (ARS) installed on five KUKA youBot robots, provides the functionality of intellectual control system built on the hierarchical principle. ARS includes procedures and data structures that are responsible for the following functional capabilities:

- Management of robot platform motors and a manipulator, as well as access to information on the robot coordinates and manipulator joint values;
- Access to information from the installed sensory equipment (lidar data, camera image, battery level);
- Execution of tactical control level commands (motion to the specified point, grasping the object, etc.);
- Implementation of the strategic level commands corresponding to the individual technological operations in the multi-robot scenario (search of an object, object transportation to a specified point);
- Receiving information from the command center: a) receiving control commands in the manual, semi-automatic and multi-agent modes b) receiving the coordinates of the robot refined with a video-navigation system;
- The transfer of information to the command center: a) the transfer of odometer readings b) video transmission) scanning lidar data transmission g) transfer of either task fulfilment confirmation or notification

about impossibility of finishing the task. ARS was developed in C++ using the Lua scripting language library to allow macro commands in semi-automatic robot control mode. ARSruntimeistheUbuntu 12.04 operatingsystem.

Auxiliary software required for ARS includes ROS Hydro programming environment to interact with sensors and actuators drivers, as well as open source KUKA youBot drivers themselves.

Navigation system software (NSS) is necessary to eliminate robot odometer positioning error, as well as to determine the location of the target objects at the laboratory floor.

NSS input data are images from 16 cameras, evenly spaced at a height of 4.5 m. above the laboratory floor.

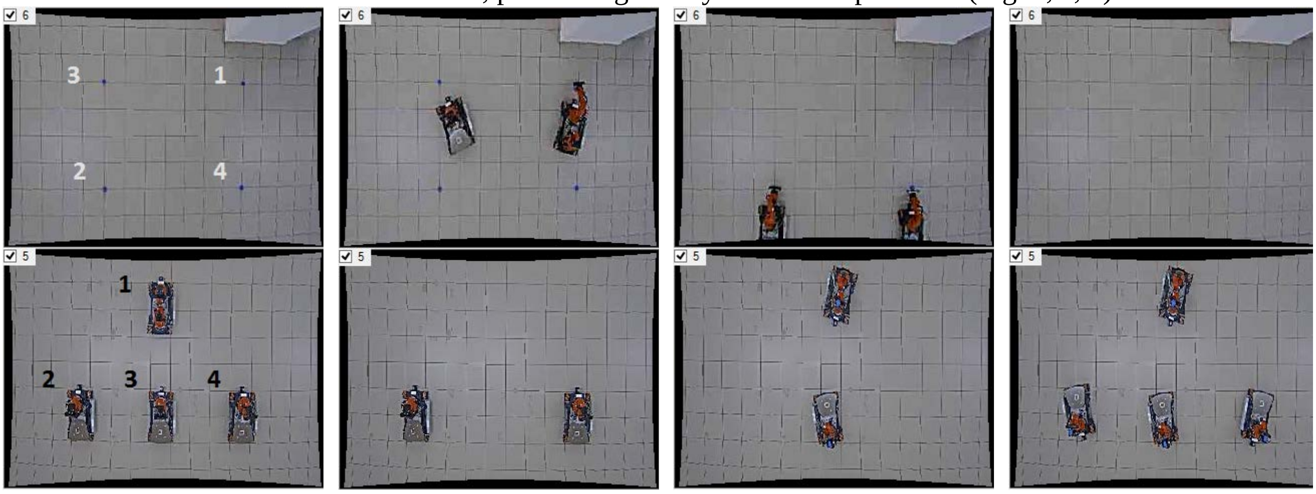
Determining the location and orientation of objects within the field of view of each camera is done with two methods of analysis of raster images:

- Method of pointwise comparison, if an object to find has a distinct hue;
- Method of neural network analysis using feed-forward multilayer neural network [5].

Found object coordinates are translated into a real coordinate system on the basis of the key points specified by the user.

Prototype experiment. As an application for debugging MARS prototype control algorithms we chose the task of object searching and transportation around the laboratory. Task scenario is depicted in Fig. 5 (position 11). Robots with given identification numbers are assigned corresponding objects to move.

In full accordance with the user group scenario robots 1 and 3 are first sent for the transportation of the most distant objects (cubes 1 and 3, respectively) as shown in Fig. 6, a, b. Upon completion of this stage of scenario robots 2 and 4 come into action, performing nearby cubes transportation (Fig. 6, c, d).



a) b) c) d)

Fig. 6. Snapshots of MARS prototype experiment in the task of object transportation

Conclusion

The presence of the experimental tools is essential to the development of any scientific and technical direction. This issue is of particular urgency and relevance to modern robotics, advanced models of which involve the integration of the latest achievements in the field of mechanics and electronics, intellectual control and navigation, taking into account the specifics of the actual applications.

Features and equipment deployed in MIREA laboratory combined with the theoretical groundwork, accumulated over the past few years, allow to start full-scale experimental studies in a wide variety of problems of intelligent robotics, including:

- Terrain mapping, construction of engineering structures, demolition debris removal, exploration and neutralization of infection sources during emergency situations on the basis of ground- and air-based robots interaction;
- Coordinated movement of groups of robots and their re-formation in a predetermined spatial configurations;
- Development of methods and technologies for complex processing of diverse information and forming models of the operation environment, as well as algorithms of self-learning and forecasting in control of autonomous robots and multi-agent robotic systems;
- Development of models and algorithms for human-computer interaction with multi-agent autonomous robots and robotic systems

1. Makarov I.M., Lokhin V.M., Manko S. V., Romanov M.P., Kriuchenkov E.N., Kucherskii R. V., Hudak U. I. Modeli i algoritmy planirovaniia deistvii i raspredeleniia zadanii v multiagentnykh

robototekhnicheskikh sistemakh // Mehatronika, avtomatizatciia, upravlenie №5, 2012, pp. 44 – 50
2. Manko S.V., Alexandrova R.I., Diane S.A.K. Cheloveko-mashinny interfeis dlia multiagentnykh robototekhnicheskikh sistem // Izvestiia UFU. Tekhnicheskie nauki. — 2014. — №3. — pp. 183-193.
3. Bischoff , R .: KUKA youBot - a mobile manipulator for research and education . In : Proc. Inter. Conf. on Robotics and Automation pp. 1–4 (2011)
4. Makarov I.M., Lokhin V.M., Manko S. V., Romanov M.P. Printcipy postroeniia i problemy razrabotki multiagentnykh robototekhnicheskikh sistem. Mehatronika, avtomatizatciia, upravlenie №3, 2012, pp. 11 – 16
5. Simon O. Haykin, Neural Networks and Learning Machines, Third Edition, Prentice Hall, 2008

С.В. Манько, С.А.К. Диане, А.К. Новосельский

МАКЕТНЫЙ ОБРАЗЕЦ МНОГОАГЕНТНОЙ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НА БАЗЕ ПЛАТФОРМЫ KUKA YOUBOT

МИРЭА, Москва
cpd@mirea.ru, sekoudiane1990@gmail.com, novosselski@gmail.com

Введение

Планирование целесообразных действий многоагентных робототехнических систем (МАРС) для целого ряда приложений осуществляется на основе анализа сценария поэтапной реализации решаемой прикладной задачи. Соответствующая сценарная модель строится в виде сети типовых конечных автоматов, структура взаимосвязей и состояние которых отражают логику следования и стадию выполнения необходимых технологических операций. При этом, выявление доступных для исполнения операций осуществляется по мере очередности завершения предыдущих (Рис. 1), обеспечивая возможность формирования заданий для интеллектуальных автономных роботов, действующих в составе многоагентной системы [1].

Так, типовой элемент для описания технологической операции в составе сценарной модели выполнения решаемой прикладной задачи может быть представлен конечным автоматом вида:

$$K^O = \left\{ U^O, X^O, Y^O, f^O, h^O \right\}, (1)$$

где

$U^O = \left(u_0^O, u_1^O, u_2^O \right)$ - входной алфавит;

$X^O = \left(x_0^O, x_1^O, x_2^O \right)$ - алфавит состояний;

$Y^O = \left(y_0^O, y_1^O, y_2^O \right)$ - выходной алфавит в соответствии с табл. 1.

f^o, h^o - функции переходов и выходов, задаваемые диаграммой, изображенной на Рис. 2.

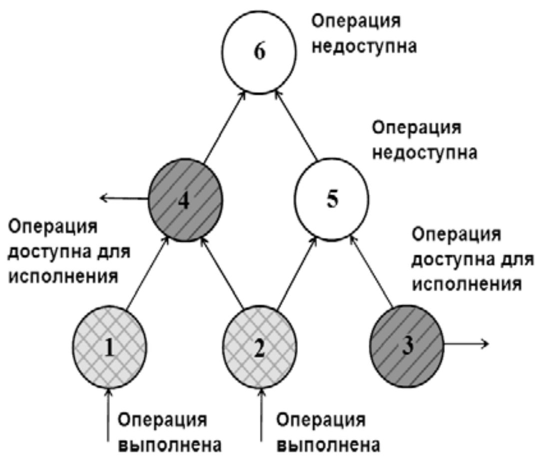


Рис. 1. Сценарий выполнения групповой задачи

Табл. 1

Алфавиты конечного автомата в модели процесса выполнения технологической операции

Входной алфавит	Алфавит состояний	Выходной алфавит
u_0^O - входной сигнал о наличии невыполненных операций, предшествующих данной	x_0^O - состояние «операция не выполнена»	y_0^O - выходной сигнал, подтверждающий, что операция находится в состоянии «не выполнена»
u_1^O - входной сигнал об отсутствии невыполненных операций предшествующих данной	x_1^O - состояние «операция передана на выполнение»	y_1^O - выходной сигнал, подтверждающий, что операция передана на выполнение
u_2^O - входной сигнал о завершении данной конкретной операции	x_2^O - состояние «операция выполнена»	y_2^O - выходной сигнал, подтверждающий, что операция выполнена

В общем случае изменение статуса технологических операций осуществляется на основе интерпретации данных, сообщаемых автономными агентами по мере их выполнения. Полученные значения показателя статуса позволяют обеспечить обновление текущего состояния сценарной модели, используемой для планирования заданий по выполнению поставленной прикладной задачи. В то же время, маркировка соответствующих узлов сценарного графа с учетом показателей статуса обусловливает возможность графического отображения хода и результатов реализации формируемых планов на мониторе оператора.

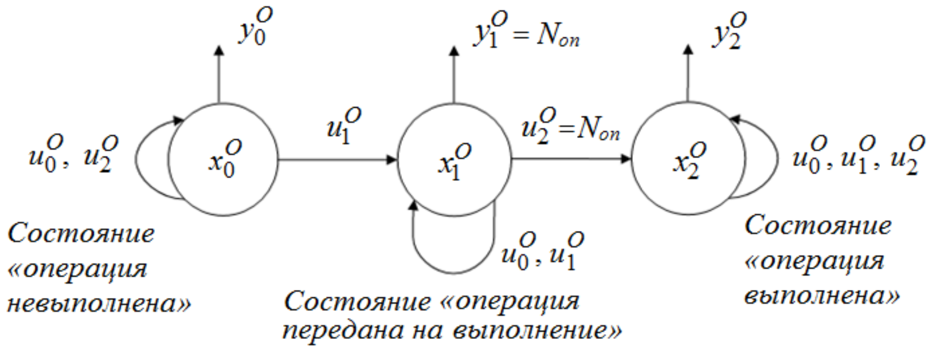


Рис. 2. Диаграмма переходов автомата, контролирующего выполнение операции в составе сценария решения поставленной прикладной задачи

Научно-исследовательский полигон

Описанный подход к планированию действий в МАРС был успешно протестирован в рамках имитационного моделирования на ЭВМ [1,2]. Итоговая апробация полученных результатов стала возможной с введением в эксплуатацию научно-исследовательской лаборатории МИРЭА для полнонатурного моделирования и макетирования перспективных образов автономных роботов и многоагентных робототехнических систем (Рис. 3).

Рис. 3. Универсальный полигон МИРЭА

В состав научно-исследовательской лаборатории входят: 2 роботизированные рукиKUKAIIWA 7 R800; 2 высокоточных быстродействующих манипуляционных робота Galileo; 2 мультикоптера МК-МИРЭА-Т; 5 мобильных роботов KUKAyouBot [3]; 16 камер видеонаблюдения для мониторинга перемещений мобильных роботов.

Бортовая система управления KUKAyouBot работает под управлением процессора IntelAtom 1700 МГц. Доступный объем оперативной памяти составляет 2 Гб. На борту робота установлена операционная система Ubuntu 12.04. Платформа также оснащена USB-разъемами для подключения информационно-измерительных устройств. Так, сенсорное оснащение робота включает следующие аппаратные средства:

- лазерный дальномер HokuyoURG-04LX-UG01 (диапазон измерения 5,6м; сектор сканирования 240°, разрешение: 0,36°, скорость сканирования 100мс/скан, габаритные размеры 50х50х70мм, вес 160г, потребляемый ток 500мА, напряжение питания 5В, интерфейс USB 2.0);
- стерео видеокамера AsusXTIONPROLIVE с инфракрасным датчиком глубины (область обзора 58° по горизонтали, 45° по вертикали, разрешающая способность 1280*1024 точек в режиме видеоизображения и 640*480 в режиме измерения глубины сцены);
- роутер OmniTIKUPA-5HnD - всепогодная точка доступа с двухполяризованными антеннами с возможностью работы в режиме MESH сети (имеет 5 портов 10/100 Ethernet, встроенный 400 мВт 5

ГГц 802.11a/pрадиомодуль, обеспечивающий возможность подключения клиентов с совместимыми приемо-передающими устройствами на расстоянии до 3 км прямой видимости).

Исполнительным устройством робота является 5-звенный манипулятор KUKA с двухпальцевымсхватом и 4-х приводное основание с омни-направленными колесами (крутящий момент 82 Н*м). Вес робота составляет 20 кг, допустимая нагрузка 20 кг. В зависимости от комплектации робот может оснащаться как одним, так и двумя манипуляторами.

Наряду с аппаратным обеспечением научно-исследовательской лаборатории МИРЭА неотъемлемой ее частью является программное обеспечение, отвечающее за управление робототехническими агентами, а также за сбор и обобщение информации об их состоянии. На рис. 4 представлена структурная схема комплекса программных средств, обеспечивающего работу макетного образца МАРС.

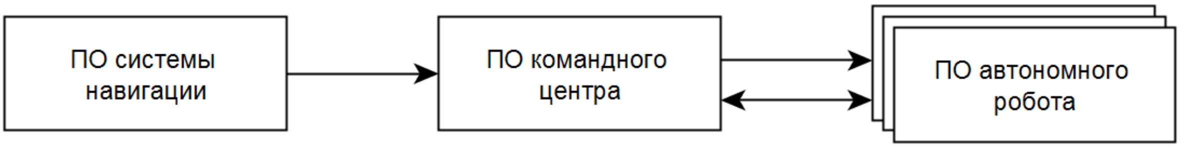


Рис. 4. Структура программного обеспечения макетного образца МАРС

Программное обеспечение командного центра (ПОКЦ) решает задачи формирования команд для различных уровней СУ роботов KUKAyouBot в ручном и автоматическом режимах управления. Принятие управляющих решений в автоматическом режиме базируется на комплексном анализе поступающей информации о местоположении робототехнических агентов, характере и состоянии выполнения назначенных им прикладных задач.

По результатам обобщения разнородной сенсорной информации ПО командного центра формирует модель среды функционирования МАРС, включающую информацию о положениях и ориентации робототехнических агентов, а также о местоположении предметов целевого интереса [4].

Пользовательский интерфейс ПОКЦ представлен на Рис. 5. Окно программы содержит 5 идентичных по функциональному составу вкладок для управления отдельными робототехническими агентами, а также вкладку группового управления.

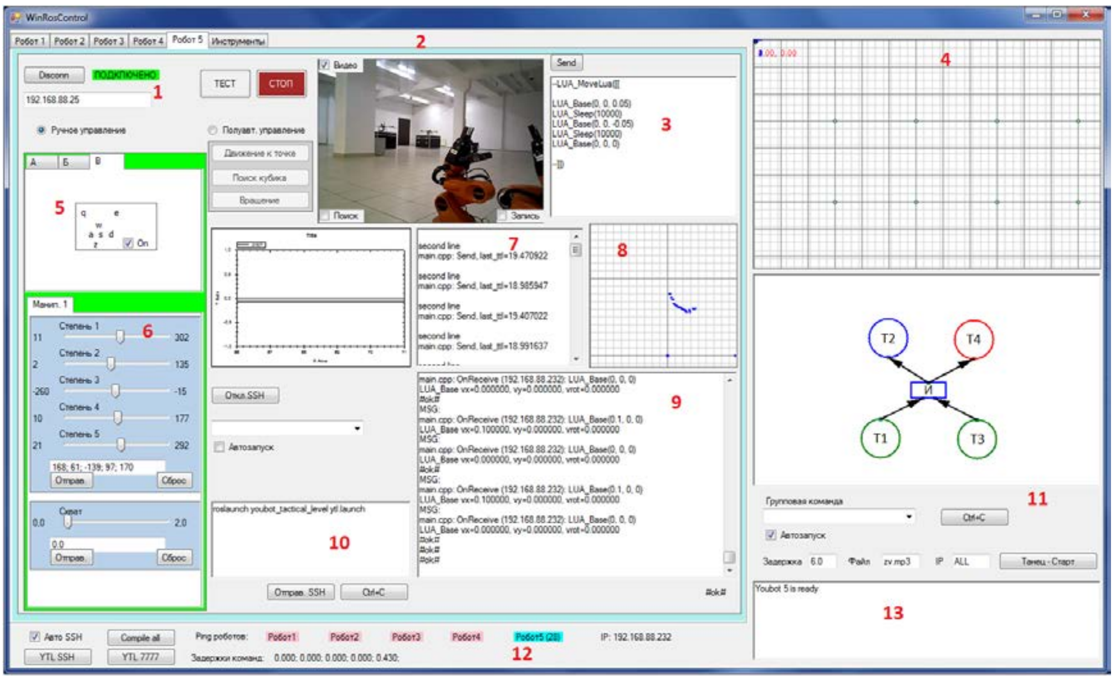


Рис. 5. Пользовательский интерфейс командного центра

Интерфейс пользователя включает следующие группы графических элементов управления:

1. область настройки TCP соединения для обмена информацией с ПО автономного робота;
2. область отображения видеоизображения с бортовой камеры робота;
3. область редактирования и отправки макро-команд (на языке Lua) для выполнения на тактическом уровне СУ робота;
4. область отображения местоположений роботов и другой информации по формируемой модели

среды;
5. инструменты ручного управления подвижной платформой робота;
6. инструменты ручного управления манипуляционным устройством робота;
7. область отображения информации о выполнении роботом команд в режимах полуавтоматического и автоматического управления;
8. область отображения данных со сканирующего лидара о препятствиях на пути робота;
9. терминал операционной системы, установленной на борту робота, отображаемый с использованием SSH-соединения;
10. область ввода команд бортовой операционной системеотдельного робота;
11. область отправки групповых команд робототехническим агентам;
12. область индикаторов соединения с роботами и уровня заряда аккумуляторных батарей, установленных на их борту;
13. область уведомлений о ходе инициализации робототехнических агентов.

Программное обеспечение автономного робота (ПОАР), установленное на пяти роботах KUKAyouBot, реализует функционал интеллектуальной системы управления, построенной по иерархическому принципу. ПОАР включает в свой состав процедуры и структуры данных, отвечающие за следующие функциональные возможности:

– управление электроприводами подвижной платформы и манипулятора, а также доступ к информации о пройденном пути и обобщенных координатах звеньев;
– доступ к информации, поступающей от установленных измерительных приборов (данные лидара, изображение с видеокамеры, уровень заряда аккумуляторных батарей);
– выполнение команд тактического уровня (перемещение в указанную точку, захват предмета и др.);
– выполнение команд стратегического уровня, соответствующих отдельным технологическим операциям в рамках группового сценария (поиск предмета целевого интереса, транспортировка предмета целевого интереса в указанную точку);
– прием информации из командного центра: а) прием управляющих команд в ручном, полуавтоматическом и многоагентном режимах б) прием координат местоположения робота, уточненных с использованием системы видеонавигации;
– передача информации в командный центр: а) передача показаний одометрии б) передача видеоизображения в) передача данных сканирующего лидара г) передача подтверждений выполнения поставленных задач или же уведомлений о невозможности их выполнения.

ПОАР разработано на языке С++ с использованием библиотеки скриптового языка Lua для исполнения макро-команд в режиме полуавтоматического управления роботом. Средой выполнения ПОАР является операционная система Ubuntu 12.04.

Вспомогательное программное обеспечение, необходимое для работы ПОАР включает программную среду ROSHydro для взаимодействия с драйверами информационных и исполнительных устройств, а также непосредственно драйверы KUKA youBot, находящиеся в открытом доступе.

Программное обеспечение системы навигации (ПОСН) необходимо для устранения погрешности одометрической системы определения местоположений роботов, а также для определения местоположения предметов целевого интереса на территории полигона.

Входными данными ПОСН являются изображения с 16 видеокамер, равномерно расположенных на высоте 4,5 м. от поверхности полигона.

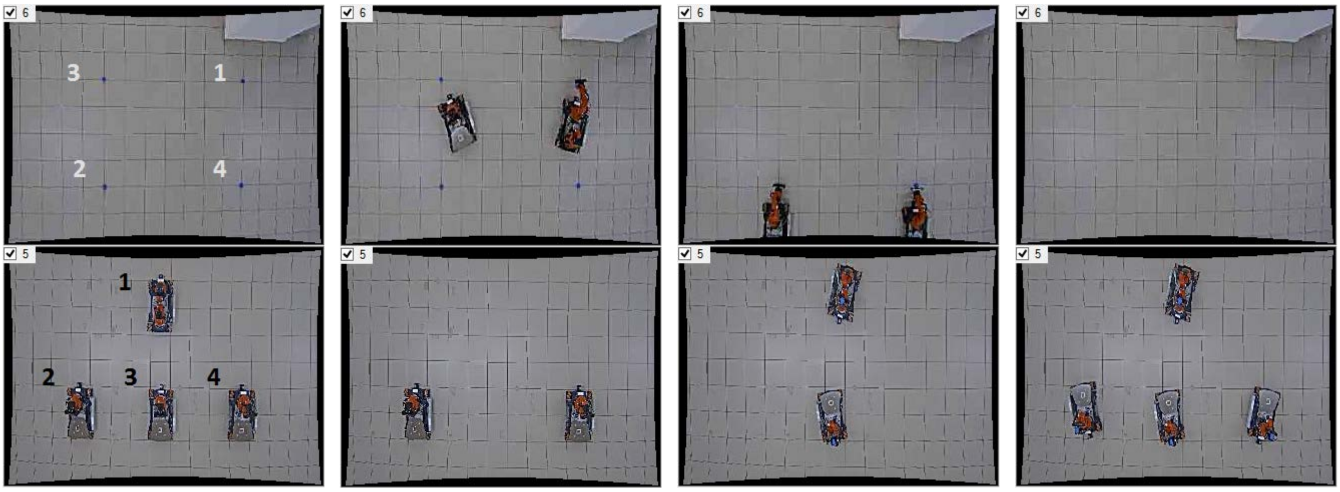
Определение местоположения и ориентации объектов в поле зрения каждой камеры производится двумя методами анализа растровых изображений:
- методом поточечного сравнения, если заранее известно, что объект имеет ярко выраженный цветовой оттенок;
- методом нейросетевого анализа с использованием предобученной многослойной нейронной сети прямого распространения [5].

Найденные координаты объектов переводятся в реальную систему координат на основе информации о базовых точках, заданных пользователем.

Натурный эксперимент

В качестве прикладной задачи для отладки алгоритмов группового управления на макетном образце МАРС была выбрана задача поиска и транспортировки предметов на местности. Сценарий выполнения задачи изображен на рис. 5 (позиция 11). Роботам с заданными идентификационными номерами назначаются соответствующие кубики для перемещения.

Согласно пользовательскому сценарию в первую очередь роботы 1 и 3 отправляются на транспортировку наиболее удаленных объектов (кубики 1 и 3, соответственно), как показано на рис. 6, а, б. По завершении данного этапа выполнения прикладной задачи в действие вступают роботы 2 и 4, выполняя транспортировку кубиков, расположенных поблизости (Рис. 6, в, г).



а) б) в) г)

Рис. 6. Фрагменты полнонатурного испытания макетного образца МАРС в задаче транспортировки предметов на местности

Заключение

Наличие экспериментальной базы является важнейшим условием развития любого научно-технического направления. Данный вопрос приобретает особую остроту и актуальность применительно к современной робототехнике, перспективные образцы которой предполагают интеграцию передовых достижений в сфере технологий механики и электроники, интеллектуального управления и навигации с учетом особенностей и специфики реальных прикладных задач.

Возможности и оборудование развернутого в МИРЭА полигона в совокупности с теоретическими заделами, накопленными за последние годы, позволяют приступить к полнонатурному моделированию широкого спектра задач прикладного применения интеллектуальных роботов, включая:

- картографирование местности, возведение инженерных конструкций, разборка завалов, разведка и нейтрализация источников заражения местности при ликвидации чрезвычайных ситуаций на основе группового взаимодействия роботов наземного и воздушного базирования;
- координированное перемещение группы роботов и их перестроение в заданную пространственную конфигурацию;
- отработка методов и технологий комплексной обработки разнородной информации и формирования моделей внешней среды, а также исследование режимов самообучения и прогноза в процессе функционирования многоагентных робототехнических систем;
- отработка моделей и алгоритмов человеко-машинного взаимодействия при управлении автономными роботами и многоагентными робототехническими системами.

1. Макаров И.М., Лохин В.М., Манько С. В., Романов М.П., Крюченков Е. Н., Кучерский Р. В., Худак Ю. И. Модели и алгоритмы планирования действий и распределения заданий в мультиагентных робототехнических системах // Мехатроника, автоматизация, управление №5, 2012, с. 44 – 50
2. Манько С.В., Александрова Р.И., Диане С.А.К. Человеко-машинный интерфейс для мультиагентных робототехнических систем // Известия ЮФУ. Технические науки. — 2014. — №3. — С. 183-193.
3. Bischoff , R .: KUKA youBot - a mobile manipulator for research and education . In : Proc. Inter. Conf. on Robotics and Automation pp. 1–4 (2011)
4. Макаров И.М., Лохин В.М., Манько С.В., Романов М.П. Принципы построенияипроблемыразработкимультиагентныхробототехническихсистем. Мехатроника, автоматизация, управление №3, 2012, с. 11 – 16
5. Simon O. Haykin, Neural Networks and Learning Machines, Third Edition, Prentice Hall, 2008

O. Shmakov, A. Rogov, D. Demidov, A. Rachitsky

A FUNCTIONAL EXTENSION OF A SMALL ROBOT BASED ON A TWO-WHEELED UNIT

RTC, Saint-Petersburg, Russia
shmakov@rtc.ru, rogov@rtc.ru

О.А. Шмаков, А.В. Рогов, Д.А. Демидов, А.В. Рачицкий

РАСШИРЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ МАЛОГАБАРИТНОГО РОБОТА НА БАЗЕ ДВУХКОЛЕСНОГО МОДУЛЯ

ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург
shmakov@rtc.ru, rogov@rtc.ru

Введение

Активное развитие технологий в области создания малогабаритных роботов в большой мере способствует разработке робототехнических платформ, пригодных для применения в различных операциях (спасательных, антитеррористических и др.).

В процессе определения перспективных робототехнических платформ, возникла потребность в создании легкого двухколесного модуля, который обладает расширенной областью применения (дистанционная инспекция, мониторинг, регистрация видеоизображения) за счет использования вспомогательных устройств в составе комплекса, а также предусматривает возможность реконфигурации для создания на его базе различных робототехнических систем.

Универсальный модуль движения

Возможность использования единого модуля движения значительно упрощает обслуживание реконфигурируемого малогабаритного робота (РМР) и позволяет быстро расширить его функционал. Универсальный модуль (рисунок 1) состоит из несущего корпуса, в котором установлены мотор-редукторы, платы управления, аккумуляторы и ТВ-камера с подсветкой в инфракрасном диапазоне (для работы в условиях пониженной освещенности).

Рис.1. Универсальный модуль

Для определения положения используются трехосевые акселерометр, гироскоп и магнитометр, которые преобразуют физические параметры в сигналы. В соответствии с полученными сигналами центральный микроконтроллер выполняет алгоритмы движения.

Управление вращением двигателей постоянного тока осуществляется с использованием обратной связи по положению вала двигателя. Центральный микроконтроллер получает и обрабатывает данные с энкодеров двигателей, регулирует передаваемую мощность силовых драйверов.

Универсальный модуль движения имеет следующие массогабаритные характеристики: масса – 260 г, внешний диаметр корпуса – 41 мм, длина корпуса – 181,5 мм.

Реконфигурации малогабаритного робота

РМР с расширенным видеообзором (рисунок 2) представляет собой самоходное устройство, состоящее из универсального модуля движения, колес и противовеса, в который встроены плата подсветки и ТВ-камера с микрофоном.

Использование колес с грунтозацепами позволяет РМР восстанавливать в автоматическом режиме свое положение после падения, а также принимать вертикальное положение для расширения видеообзора.

Рис.2. РМР с расширенным видеообзором

В таблице 1 представлены технические характеристики РМР с расширенным видеообзором.

Таблица 1

Технические характеристики РМР с расширенным видеообзором

Характеристика, ед. изм.	Значение
Масса, г	570
Длина, мм	240
Ширина, мм	181,5
Диаметр колес, мм	110
Скорость перемещения, м/с	0,24
Высота преодолеваемого препятствия, мм	55

Конфигурация РМР с повышенной проходимостью представляет собой стыковку двух универсальных модулей движения с помощью переходника (рисунок 3). Данные между участвующими в стыковке модулями передаются по заложенным в переходник проводам.

Программное обеспечение обоих модулей, участвующих в стыковке, идентично. При включении одного модуля, он автоматически запрашивает включение второго. В таком случае он становится ведущим РМР, а второй модуль, соответственно, ведомым.

В таблице 2 представлены технические характеристики РМР с повышенной проходимостью.

Рис. 3. РМР с повышенной проходимостью (стыковка)

Таблица 2

Технические характеристики РМР с повышенной проходимостью

Характеристика, ед. изм.	Значение
Масса, кг	1,1
Длина, мм	240
Ширина, мм	181,5
Диаметр колес, мм	110
Скорость перемещения, м/с	0,25
Высота преодолеваемого препятствия, мм	60

Увеличение проходимости РМР возможно также за счет применения колес с изменяемой геометрией (рисунок 4), каждое из которых состоит из двух частей: протектора и реконфигурируемого колеса. Также к универсальному модулю движения прикреплен жесткий противовес, обеспечивающий устойчивость РМР (рисунок 5).

Рис. 4. Колесо с изменяемой геометрией

Рис. 5. РМР с колесами с изменяемой геометрией

В таблице 3 представлены технические характеристики РМР с колесами с изменяемой геометрией.

Таблица 3

Технические характеристики РМР с колесами с изменяемой геометрией

Характеристика, ед. изм.	Значение
Масса, г	570
Длина, мм	240
Ширина, мм	181,5
Диаметр колес, мм	110
Скорость перемещения, м/с	0,2
Высота преодолеваемого препятствия, мм	140

На рисунке 6 показано преодоление РМР ступени за счет раскрытия колес с изменяемой геометрией.

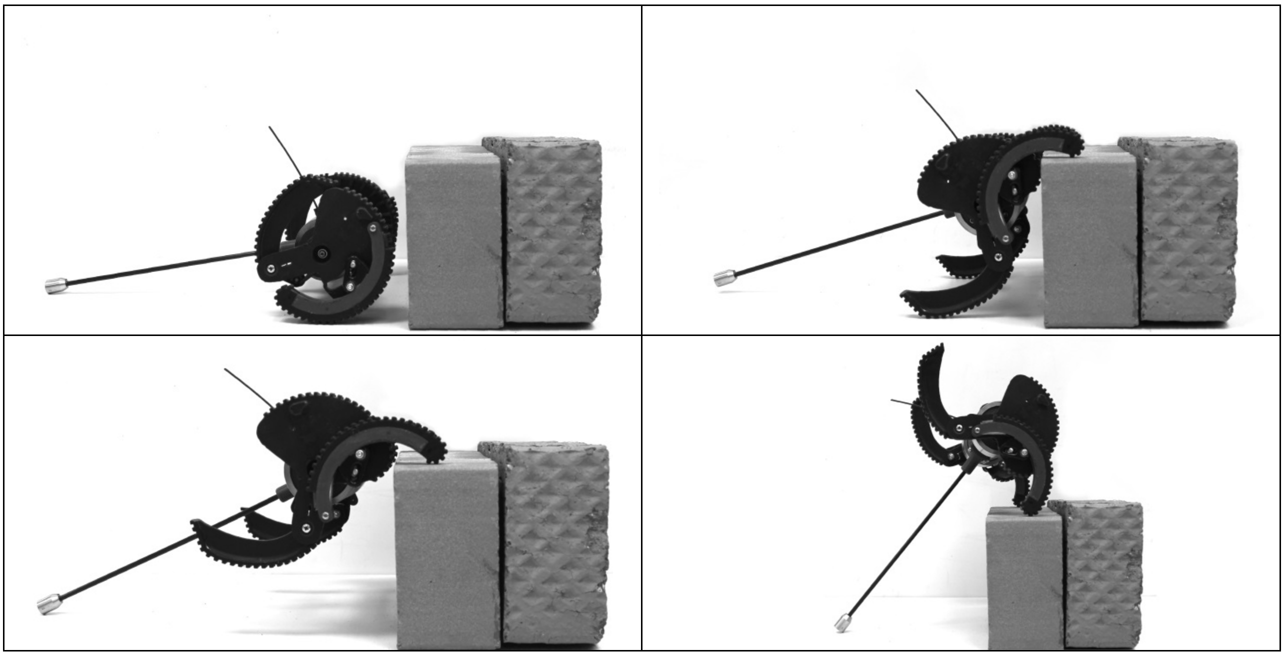


Рис. 6. Преодоление РМР с колесами с изменяемой геометрией ступени 120 мм

Движение РМР с колесами с изменяемой геометрией по поверхности с изменением угла наклона или с препятствиями (высота которых не превышает половины радиуса сложенного колеса) не отличается от движения на обычных колесах. При выполнении операции заезда на ступень, высота которой превышает радиус сложенного колеса, необходима синхронизация положения колес. Это требование связано с тем, что во время преодоления препятствия, при отставании вращения одного колеса относительно другого, происходит несинхронное раскрытие колес, что ведет к боковому опрокидыванию конструкции. При автоматическом и удаленном ручном управлении требуется включение в систему управления контура для обеспечения автоматической синхронизации положения колес.

Решение этой проблемы – внедрение системы управления, синхронизирующей положение колес по датчику бокового крена. При раскрытии только одного из колес корпус получает боковой наклон. Для устранения крена колесо на «высокой» стороне затормаживается, а колесо на «низкой» стороне продолжает вращаться и после достижении упорным выступом необходимого положения раскрывается, уменьшая крен. Нулевому крену на горизонтальной плоскости соответствует синхронное состояние раскрытия колес.

Заключение

В ходе исследований предложены решения по расширению функциональных возможностей малогабаритного робота на базе двухколесного модуля.

Nguyen Anh Van, B. Mikhaylov, O. Eliseeva

3D SYSTEM FOR SEARCH OF SPATIAL OBJECTS USING A MANIPULATING ROBOT

Bauman MSTU, Moscow, Russia
robot@bmstu.ru

А.В. Нгуен, Б.Б. Михайлов, О.И. Елисеева

3D СИСТЕМА ОБНАРУЖЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ С ПОМОЩЬЮ МАНИПУЛЯЦИОННОГО РОБОТА

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва
robot@bmstu.ru

Введение

В настоящее время актуальна проблема создания интеллектуальных роботов для замены человека в опасных условиях. Для автономного манипулирования с объектами роботы должны анализировать окружающее пространство. Раньше для решения задачи обнаружения объектов обычно использовали

2D системы зрения. Но, эти системы не позволяют найти объекты, которые располагаются на сложном фоне, частично перекрыты другими объектами, не полностью видны или камуфлированы. В этой статье рассматривается использование системы объемного зрения для обнаружения многогранных пространственных объектов.

Сценарий работы системы обнаружения

На Рис. 1 показана схема работы системы обнаружения пространственных объектов, телекамера которой установлена манипуляторе робота. Это позволяет выполнить осмотр объектов сцены из различных точек наблюдения.

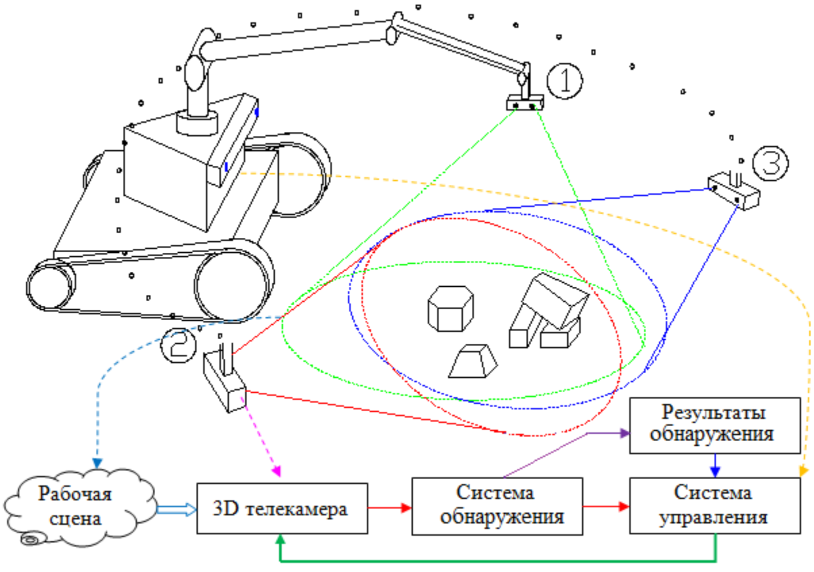
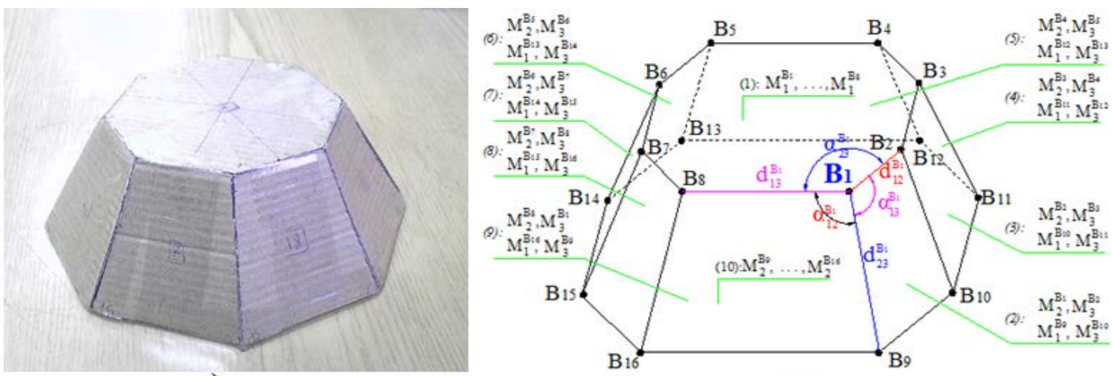


Рис. 1. Система обнаружения пространственных объектов

Например, мы хотим найти опасный пространственный объект, который показан на Рис. 2а. Для этого строится его модель с использованием характеристических точек – точек пересечения трёх граней и определяются их параметры. На Рис. 2б показано взаимное расположение 16-ти характеристических точек модели (B_1 … B_{16}) в пространстве [3, 4].



а) б)

Рис. 2. Пространственный объект (а) и его модель (б)

Каждая характеристическая точка модели, например B_1, имеет 12 параметров, которые разделены на четыре группы (Рис. 3):

α_{12}^{B1}	α_{23}^{B1}	α_{13}^{B1}	d_{12}^{B1}	d_{23}^{B1}	d_{13}^{B1}	D_{12}^{B1}	D_{23}^{B1}	D_{13}^{B1}	M_1^{B1}	M_2^{B1}	M_3^{B1}
Группа углов			Группа линий			Группа точек			Группа граней		

Рис. 3. Параметры характеристической точки

Параметры всех характеристических точек модели приведены в Таблице 1.

Таблица 1

Параметры характеристических точек модели

Точка B_i	α_{12}^B	α_{23}^B	α_{13}^B	d_{12}^B	d_{23}^B	d_{13}^B	D_{12}^B	D_{23}^B	D_{13}^B	M_1^B	M_2^B	M_3^B
1	98,3	127,6	98,3	39	70	39	2	9	8	1	2	9
2	98,3	127,6	98,3	39	70	39	3	10	1	1	3	2
3	98,3	127,6	98,3	39	70	39	4	11	2	1	4	3
4	98,3	127,6	98,3	39	70	39	5	12	3	1	5	4
5	98,3	127,6	98,3	39	70	39	6	13	4	1	6	5
6	98,3	127,6	98,3	39	70	39	7	14	5	1	7	6
7	98,3	127,6	98,3	39	70	39	8	15	6	1	8	7
8	98,3	127,6	98,3	39	70	39	1	16	7	1	9	8
9	78,8	78,8	131,8	63	63	70	10	16	1	2	10	9
10	78,8	78,8	131,8	63	63	70	11	9	2	3	10	2
11	78,8	78,8	131,8	63	63	70	12	10	3	4	10	3
12	78,8	78,8	131,8	63	63	70	13	11	4	5	10	4
13	78,8	78,8	131,8	63	63	70	14	12	5	6	10	5
14	78,8	78,8	131,8	63	63	70	15	13	6	7	10	6
15	78,8	78,8	131,8	63	63	70	16	14	7	8	10	7
16	78,8	78,8	131,8	63	63	70	9	15	8	9	10	8

В начальной точке наблюдения (точка 1, Рис. 1) система формирует текущее описание сцены, находит на нем характеристические точки и определяет их параметры. После этого система начинает процесс обнаружения путем сравнения параметров характеристических точек объекта сцены и точек модели. Результат сравнения дает степень похожести объекта и модели [4]. Если степень похожести достаточна, то процесс закончен и тогда объект можно отмечать маркером или взять манипулятором.

Если из начальной точки наблюдения система дает низкую вероятность обнаружения, то робот выполняет гностические движения. По полученному результату обнаружения в первой точке наблюдения система рассчитывает координаты следующей точки, и робот автоматически передвигает туда телекамеру (точка 2, Рис. 1). Если из второй точки наблюдения вероятность обнаружения тоже мала, то процедура повторяется в третьей точке и т.д. Этот процесс повышает надёжность обнаружения, особенно, для пространственных объектов, которые частично перекрыты другими объектами или камуфлированы.

Метод обнаружения многогранных пространственных объектов

В работе предлагается алгоритм обнаружения объектов путем сравнения параметров характеристических точек реальных объектов и их пространственных моделей. Ниже показаны этапы алгоритма обнаружения (Рис. 4) [3, 4].

После совмещения модели и объекта система определяет параметры невидимых характеристических точек реального объекта по его модели и далее рассчитывает координаты следующей точки наблюдения и реальные размеры объекта.

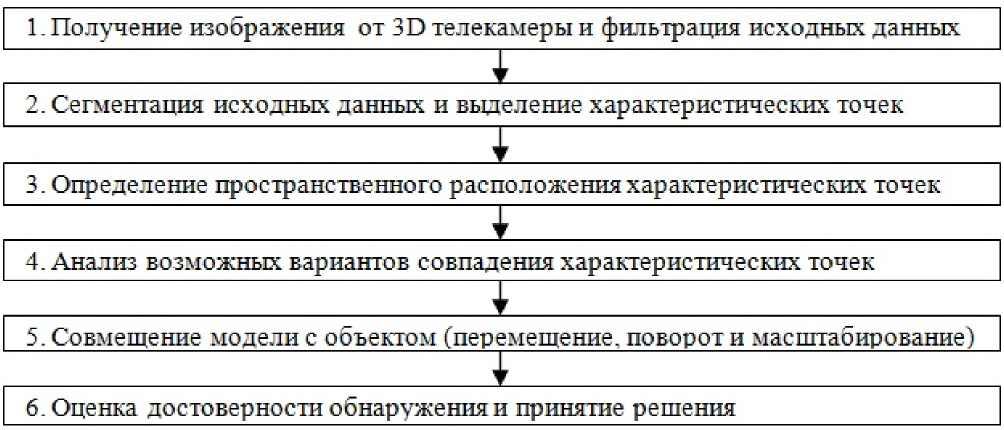
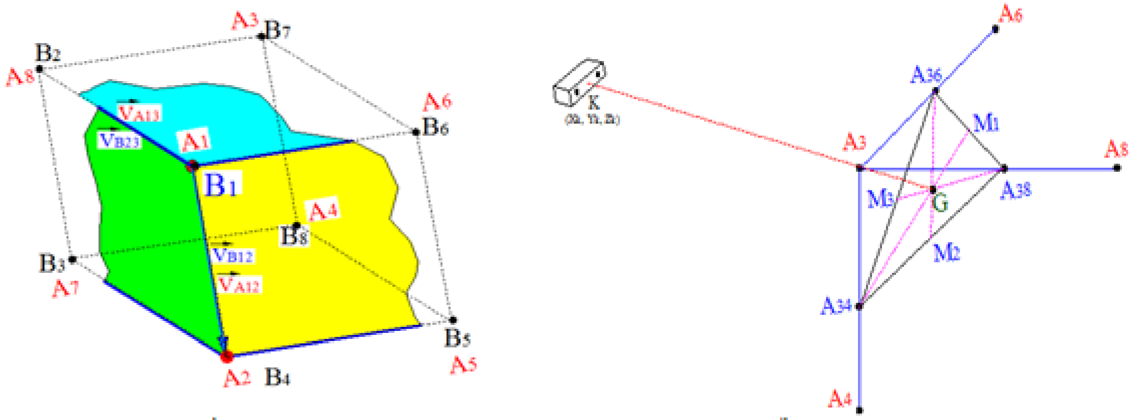


Рис. 4. Этапы обнаружения многогранных трехмерных объектов

Способ определения координат следующей точки наблюдения

На Рис. 5а показан пример определения невидимых точек параллелепипеда после его совмещения с моделью по результатам обнаружения в начальной точке наблюдения [4].

Для выбора новой точки наблюдения предлагается использовать количество связей каждой невидимой характеристической точки, но учитывать только связи с невидимыми точками. Следует отметить, что число связей каждой точки - три или более. Однако, если считать связи только невидимых точек, то их число имеет меньшее значение.



а) б)

Рис. 5. Результат совмещения модели и объекта (а) и выбор следующей точки наблюдения (б)

Рассмотрим Рис. 5а: невидимая точка A_8 связана с точкам A_1, A_3 и A_7. Но, при этом A_3 и A_7 являются невидимыми точками, а точка A_1 - видимая. Поэтому число связей точки A_8 равно двум ($n_{A8}=2$). Аналогично точка A_3 имеет связи с тремя невидимыми точками A_4, A_6 и A_8, т.е. $n_{A3} = 3$. Подсчитывая связи всех невидимых точек объекта, выбираем точку с максимальным значением. В данном случае это точка A_3 (Рис. 5а).

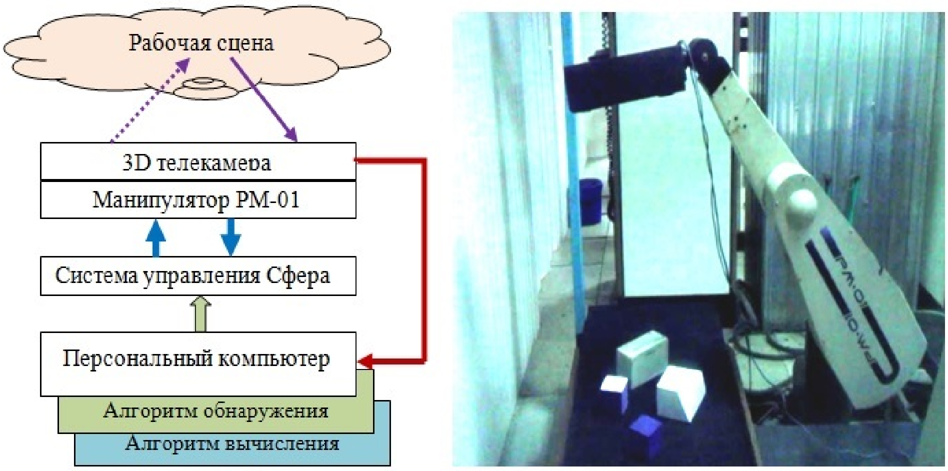
Для определения координат и направления телекамеры в следующей точке наблюдения, предложен следующий подход: выбираем три точки A_{34}, A_{36} и A_{38} на линиях пересечения $A_3 A_4$, $A_3 A_6$ и A_3A_8 так, чтобы $A_3A_{34}=A_3A_{36}=A_3A_{38}=d$, где d – заданное значение (Рис. 5б). Определяем координаты точки G центрального треугольника $A_{34}A_{36}A_{38}$ [2]. Координаты следующей точки наблюдения K рассчитываем с учетом параметров телекамеры: угла поля зрения, фокусного расстояния, глубины резкости и т.д.

Построение траектории движения робота в следующую точку наблюдения

Для проведения экспериментальных исследований предложенных алгоритмов, был разработан и изготовлен стенд, состоящий из:

- манипулятора "РМ-01" [1] ;
- стойки управления "Сфера 36" [8];
- персонального компьютера "Processor Intel Core i5- 4200CPU 2.3GHz";
- 3D телекамеры "Artec L ™ [7]".

Структура экспериментального стенда показана на Рис. 6а, а его внешний вид - на Рис. 6б. С использованием этого стенда, была проведена работоспособность системы распознавания с реальными объектами из разных точек наблюдения.



а) б)

Рис. 6. Структура экспериментального стенда (а) и его внешний вид (б)

В данной работе выполняется движение схвата манипулятора с 3D телекамерой вдоль некоторой пространственной траектории, поэтому была решена обратная задача кинематики для планирования траектории движения манипулятора "PM-01" в пространстве обобщенных координат [5, 6].

Рассмотрим пример, показанный на Рис. 7. Здесь K_1 – координаты первой точки наблюдения. Из этой точки в результате поиска система нашла объект по двум характеристическим точкам A_1 и A_2. Для повышения достоверности обнаружения система определила координаты следующей точки наблюдения (K_2) и направление 3D телекамеры (K_2A_3). С помощью этих данных система управления манипулятора решает обратную задачу по положению и манипулятор передвигает телекамеру в следующую точку наблюдения, из которой получается еще одно изображение рабочей сцены.

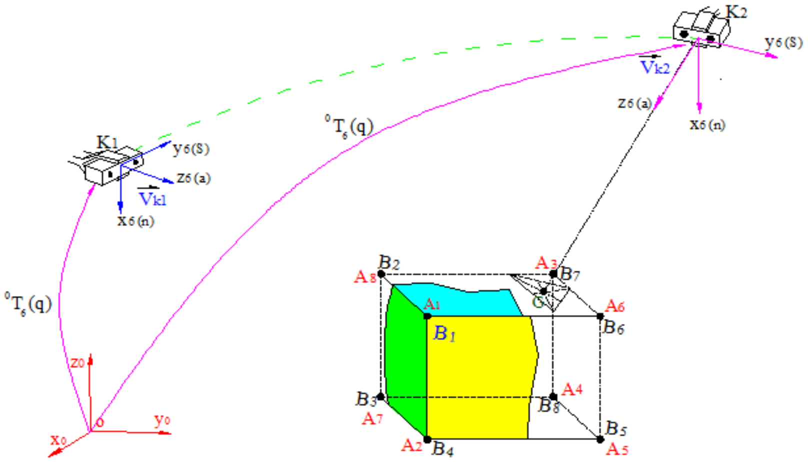


Рис. 7. Расположение 3D телекамеры относительно объекта в двух точках наблюдения

Из каждой точки наблюдения 3D телекамера дает изображение сцены в собственной системе координат. Для совмещения двух изображений система рассчитывает однородную матрицу перехода от второй точки наблюдения к первой и затем выполняет распознавание объекта уже по совмещенному изображению.

Экспериментальные исследований системы обнаружения

<u>Работа системы с реальными объектами</u>. На Рис. 8 показаны результаты обнаружения реальных объектов. При поиске образца 1 система зрения из первой точки наблюдения получила степень совпадения около 37,5% по 6-ти найденными характеристическим точками, а при использовании второй точки наблюдения, степень совпадения увеличилась до 75% по 12-ти найденными точками. Аналогично, для образца 2, из первой точки наблюдения получена степень совпадения 25%, и 100% из двух точек наблюдения; для образца 3 - 25% и 100%; для образца 4 (объекта производной формы) — 25% и 100%, соответственно.

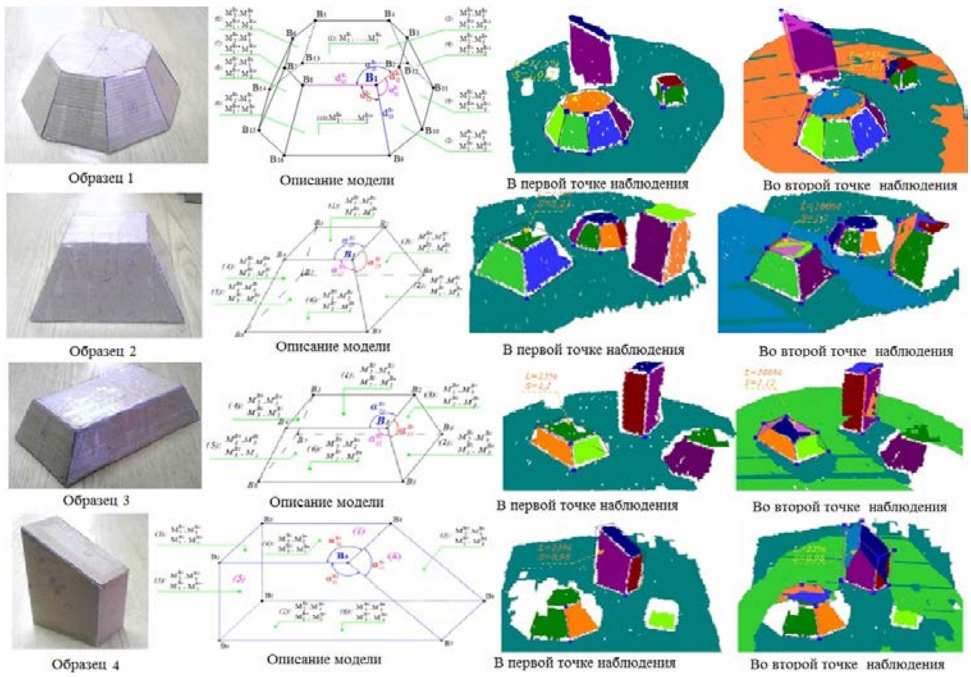
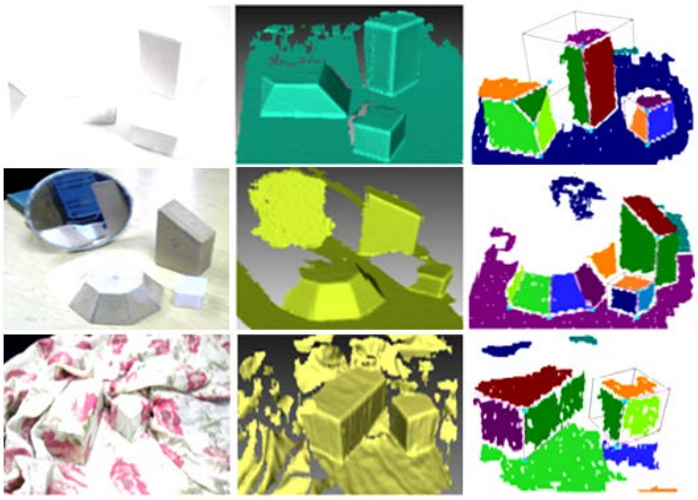


Рис. 8. Обнаружение образцов реальных объектов

Полученные результаты работы 3D системы зрения с различными реальными объектами подтвердили эффективность предложенных алгоритмов обнаружения.

Работа системы зрения в различных условиях. На Рис. 9 показаны результаты обнаружения параллелепипеда в различных условиях: на монохромных сцены, при наличии зеркальных поверхностей, с камуфлированными объектами. Полученные результаты показали, что качество работы системы практически не зависит от внешних условий работы.



а) б) в)

Рис. 9. Обнаружение параллелепипеда при различных условиях работы: а) реальные сцены; б) 3D изображения сцен; в) результаты обнаружения параллелепипеда

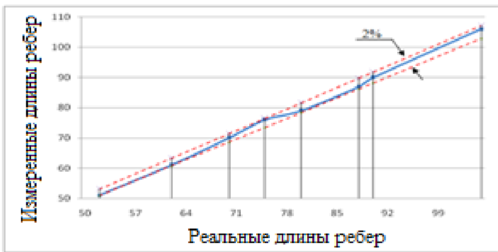
Анализ точности измерения размеров и координат объектов

Как отмечалось выше, система объемного зрения в процессе обнаружения объекта определяет его координаты и геометрические размеры. На Рис. 10а показана сложная пространственная сцена робота. На ней находятся три разных объекта, расположенные один на другом. На этой сцене система зрения нашла 8 ребер и 9 характеристических точек. Реальные размеры ребер и результаты их измерений приведены в таблице (Рис. 10б). Зависимость полученных результатов (Рис. 10в), имеет практически линейный характер, а абсолютная ошибка измерения (нелинейность) не превышает 2%.

а)

№	Ребра	Реальный размер	Результаты измерения	Абсолютная ошибка (%)
1	A5A7	52	51	1,92
2	A8A9	62	61	1,61
3	A3A5	70	70	0
4	A3A4	75	76	1,33
5	A1A2	80	79	1,25
6	A5A6	88	87	1,14
7	A6A7	90	90	0
8	A4A6	105	106	0,95

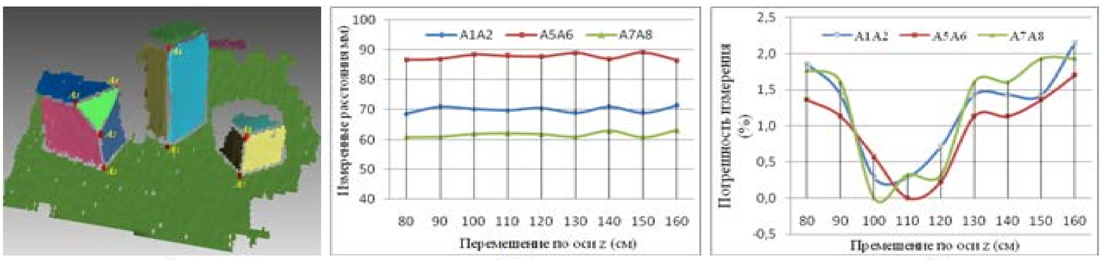
б)



в)

Рис. 10. Результаты измерения размеров ребер объектов

На Рис. 11а показана сцена, на которой расположены куб, параллелепипед и многогранный объект. В процессе эксперимента изменялось расстояние от телекамеры до центра сцены от 800 до 1600 мм с шагом 100 мм, и фиксировались размеры ребер объектов. На Рис. 11б приведены результаты измерения трёх ребер A1A2, A5A6 и A7A8. Как видно из Рис. 11в ошибки измерения размеров не превышают 2,1% во всём диапазоне расстояний.



а) б) в)

Рис. 11. Оценка погрешности измерения длин ребер

Таким образом, полученные результаты показывают, что предложенная система объемного технического зрения может быть использована для измерения координат и размеров объектов рабочей сцены.

Выводы

Рассмотрен метод обнаружения многогранных пространственных объектов на основе сравнения параметров характеристических точек объекта и его модели.

Предложен способ определения координат следующей точки наблюдения рабочей сцены, если вероятность распознавания из данной точки мала.

Дано краткое описание стенда для исследования работоспособности предложенных алгоритмов. Приведены результаты экспериментальных исследований системы обнаружения, которые подтвердили эффективность предложенных решений при работе с реальными объектами.

Исследована работоспособность системы обнаружения с разными объектами при различных условиях работы: при изменении освещенности, на зеркальной поверхности, с камуфлированными объектами и т.д. Полученные результаты показали, что систему можно использовать для обнаружения и измерения параметров пространственных объектов в реальных условиях.

1. Зенкевич, С. Л. Основы управления манипуляционными роботами: учебник для вузов / С. Л. Зенкевич, А. С. Ющенко.– 2-е изд., испр. и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 478 с.
2. Канатиков, А. Н. Аналитическая геометрия: учебник для вызов / А. Н. Канатиков, А. П. Крищенко ; под общ. ред. В. С. Зарубина, А.П. Крищенко. – 3-е изд. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 388 с.
3. Михайлов, Б. Б. Использование характеристических точек для распознавания 3D-объектов / Б. Б. Михайлов, А. В. Нгуен // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2014. – №11. – С. 27-32.
4. Нгуен, А. В. Способ распознавания многогранных пространственных объектов / А. В. Нгуен, Б. Б. Михайлов // Информатика. Телекоммуникации. Управление Т5(181). – СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2013. – С. 125-131.
5. Орлов, И. А. Синтез движения манипуляционных систем для пространств со сложными связями и ограничениями: дис. ... канд. тех. наук: 01.02.01 / Орлов Игорь Александрович. – М., 2013. – 102 с.
6. Решение ОЗК в пакете Wolfram Mathematica [Электронный ресурс] https://bitbucket.org/orlovbel/puma-kinematics/overview
7. Трехмерная телекамера Artec LTM [электронный ресурс]: http://www.artec3d.com/ru/hardware/artec-l/
8. Ющенко, А. С. Робототехнический комплекс РМ-01 / А. С. Ющенко, А. П. Власов. – М. : Изд-во МГТУ, 1988. – 95 с.

A. Bakhshiev, D. Stepanov

APPLICATION OF COMPUTER VISION SYSTEMS TO AUTOMATIC DETERMINATION OF RELATIVE ROBOTIC APPARATUS POSITION WHEN APPROACHING AND DOCKING TO OBJECTS OF A KNOWN CONFIGURATION

RTC, Saint-Petersburg, Russia
alexab@rtc.ru

А.В. Бахшиев, Д.Н. Степанов

ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОГО ПОЛОЖЕНИЯ РОБОТИЗИРОВАННЫХ АППАРАТОВ В ХОДЕ ИХ СБЛИЖЕНИЯ И СТЫКОВКИ С ОБЪЕКТАМИ ИЗВЕСТНОЙ КОНФИГУРАЦИИ

ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург
alexab@rtc.ru

Введение

В исследовании космического пространства одной из важных задач является задача определения параметров относительного движения космических кораблей, особенно в случае стыковки [1].

Все современные транспортные и пилотируемые космические корабли, стыкующиеся с МКС, уже оснащены телевизионными системами. В статье представлен подход к определению параметров взаимного положения космического корабля и МКС с использованием только телевизионной камеры.

Постановка задачи

Решаемой задачей является определение пространственного положения наблюдаемого космического корабля (или другого объекта с известной геометрией) относительно камеры, установленной на другом корабле. Наблюдаемый объект обычно называется пассивным, а космический корабль, на котором установлена камера – активным. Задача может быть решена, используя следующую информацию:

Трехмерные пространственные координаты N>3 точек пассивного объекта относительно его системы координат (СК);

Двумерные экранные координаты тех же Nточек;

модель камеры (параметры внутренней калибровки).

Этот набор данных позволяет решить PnP-проблему [2, 3], т.е. найти положение СК наблюдаемого объекта относительно СК камеры.

На Рис. 1 показаны СК камеры и наблюдаемого объекта, используемыевстатье.Системакоординаткамерырасположенавеепринципиальнойточке. Система координат наблюдаемого объекта находится в основании мишени стыковочного узла.

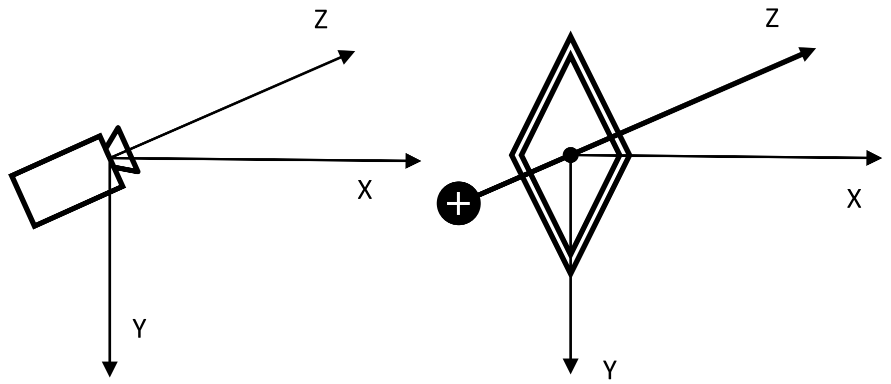


Рис.1. Системы координат камеры и мишени

Рис. 2 демонстрирует проекцию ZY системы координат стыковки. Линия визирования соединяет принципиальную точку камеры с центром стыковочной мишени. В системе координат камеры x, y, z – это линейные перемещения, aRx, Ry, Rz – углы вращения относительно соответствующих осей.

Пара угловβ^x, β^y отклонения плоскости камеры от линии визирования, пара углов α^x, α^y отклонения плоскости стыковочного узла от линии визирования, расстояние вдоль линии визирования между системами координат d и угол крена θ образуют систему координат стыковки.

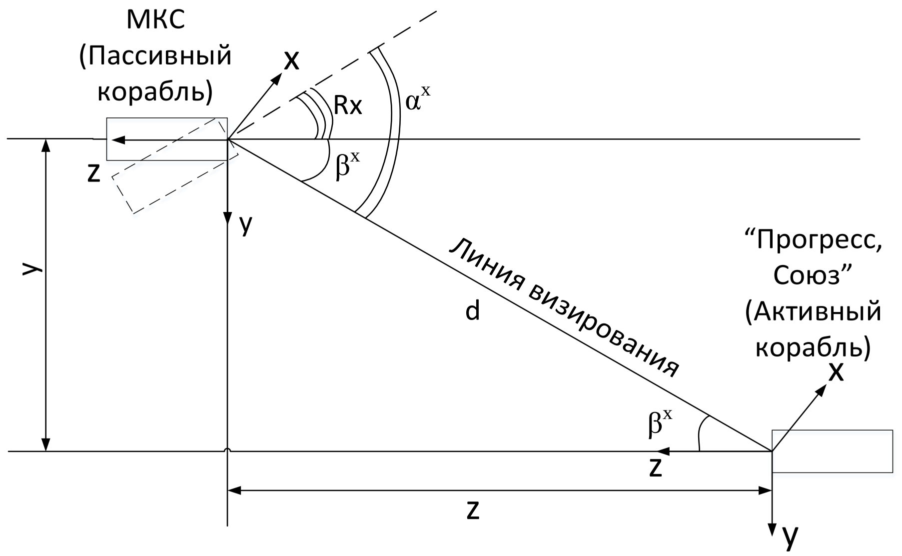


Рис.2. Связь СК стыковки с декартовой СК

Расстояниеdможет быть получено из x, yи zпо формуле (1), углы отклонения активного объекта от линии визирования β расчитываются по формуле(2)и пассивные углы α– по формуле (3).

$$\mathrm{d} = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \beta^x = atg\dfrac{x}{z} \\ \beta^y = atg\dfrac{y}{z} \end{cases} \tag{2}$$

$$\begin{cases} \alpha^x = \beta^x + Ry \\ \alpha^y = \beta^y + Rx \end{cases} \tag{3}$$

Описание алгоритма

На Рис. 3 показана общая структура алгоритма определения взаимного положения активного и пассивного космического кораблей.

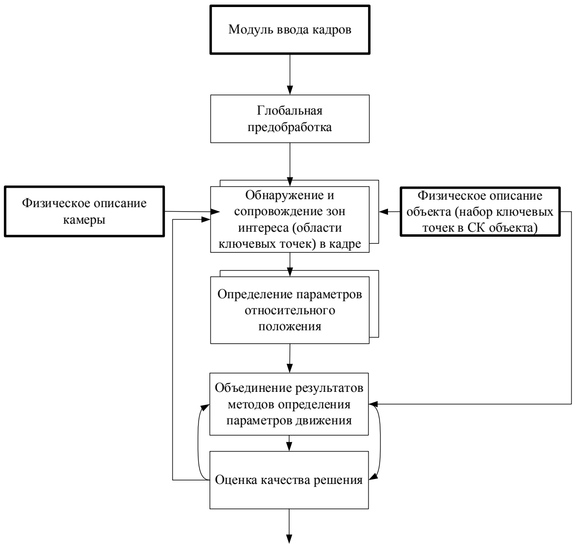


Рис.3. Общая структура алгоритма определения пространственного положения

Исследования

Алгоритм был протестирован с использованием трехмерных моделей МКС и видеозаписей стыковок. Это позволило определить допустимую погрешность определения пиксельных координат ключевых точек, которая составляет около 2 пикселей в большинстве случаев. В Таблице 1 показан пример влияния пиксельной погрешности в определении координат ключевых точек на результирующую погрешность в определении пространственного положения для случая. Показанного на Рис. 4.

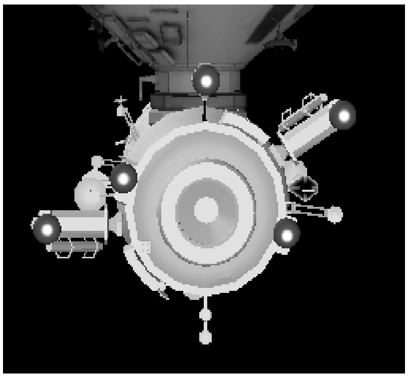


Рис. 1. Набор точек на 3D-модели МКС для тестирования
(фрагмент изображения, дистанция 200 метров)

Таблица 1

Зависимость погрешности измерения (Δ) от средней пиксельной ошибки определения координат ключевых точек

Ошибка определения точек, пикс.	$\Delta\beta^x$,°	$\Delta\beta^y$,°	Δd, %	$\Delta\alpha^x$,°	$\Delta\alpha^y$,°	Δθ,°
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	0,06	0,05	2,29	1,65	1,73	1,29
2	**0,10**	**0,09**	**4,23**	**2,90**	**2,60**	**2,43**
3	0,15	0,21	6,20	4,81	4,24	3,60

Пассивные углы являются очень чувствительными к пиксельной ошибке. Такимобразомреальнаятелевизионнаясистемабудетчастонекорректноопределятьэтиуглы. Это одна из принципиальных проблем системы с одной камерой. Она может быть решена с использованием взаимных измерений, когда устанавливается вторая камера на пассивный корабль и оба корабля одновременно решают задачу определения параметров взаимного положения.

Также проводились эксперименты в центре управления полетами с использованием видеосигнала, транслируемого со стыкующегося космического корабля в реальном времени. Было проведено три успешных эксперимента. Прототип программного обеспечения показал производительность около 1 кадра в секунду, что достаточно для стабильного обнаружения и сопровождения областей ключевых точек и определения положения на дистанциях от 200 до 2 метров.

Заключение

Предложенныйподходпозволяетопределитьотносительноевзаимноеположение космических кораблей по обнаружению и сопровождению естественных визуальных признаков. Такой подход может быть применен в разработке новых, перспективных космических кораблей и обеспечит дешевый и надежный способ определения их взаимной ориентации при стыковке и других задачах взаимодействия.

1. Бахшиев, А.В., Степанов, Д.Н.и др.Научно-технический отчёт о составной части ОКР. Разработка предложений по конструкции и технической реализации системы определения параметров относительного движения на основе обработки видеоизображения для СУДН ППТС / ГНУ ЦНИИ РТК, – СПб., 2010. – 143 с.
2. Moreno-Noguer, F., Lepetit, Y., Fua, P.: Accurate noniterative o(n) solution to the PnP problem. Proceeding of the IEEE International Conference on Computer Vision. In: Rio de Janeiro, Brazil, October, 2007. – Rio de Janeiro (2007).
3. Gao, X. S., Hou, X. R.: Complete Solution Classification for the Perspective-Three-Point Problem. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 25, pp. 930-934 (2003).

V.E. Pavlovsky, A.M. Tolkachev

MOBILE ROBOT ON TWO SPHERICAL WHEELS

Keldysh Institute of Applied Mathematics of RAS, Moscow State University, Moscow, Russia
vlpavl@mail.ru, anton-t@inbox.ru

Abstract

The work deals with theoretical-mechanical model of the two-wheeled mobile robot on spherical wheels. A main objective of work – research of dynamics and synthesis of laws of motion control of the device on linear trajectories, and synthesis of the movement in the local vicinity with stabilization of the vertical unstable pendulum established on a device platform. The model with a pendulum is approximate model of the device with the person who is (standing) on the device.

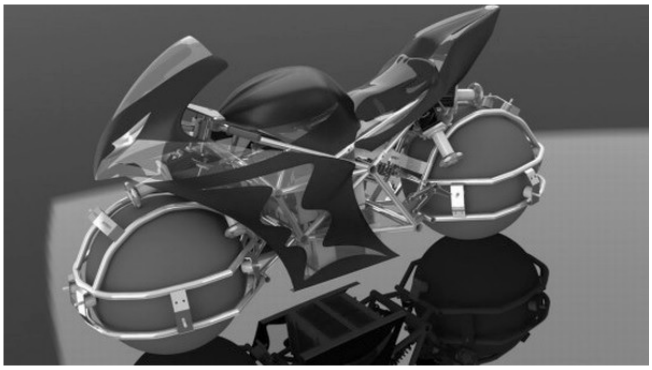
1. Introduction

The last decade is celebrated by sharp increase of interest in new family of the two-wheeled vehicles containing one wheeled pair with the case fixed on it. These devices arose as the answer to requirements of development of maneuverable vehicles.

Cars of this kind can be divided into three groups:

– devices without any stabilization of a platform,
– devices with mechanical stabilization of a platform,
– devices with electronic stabilization of a platform.

The last of them, are the most modern devices. In 2001 the new vehicle developed by the Segway LLC company in which the center of mass of the body is above an axis of rotation of wheels was announced. On the one hand, placement of the center of masses above an axis of rotation allowed to reduce considerably diameters of wheels and dimensions of the device, but on the other hand there was a need of stabilization of such system as it is statically unstable. The maximum speed of a scooter is low — 20 km/h. The scooter is ready to stand the owner weighing up to 118 kg whereas 47,7 - 54,4 kg, depending on model itself weigh. A cruising range is equal to 39 km. Full charging from the home socket takes 8 hours. It should be noted that scooters of Segway became quite popular and find application in various technical spheres. The scooter is shown in Fig. 1a.



a) b)

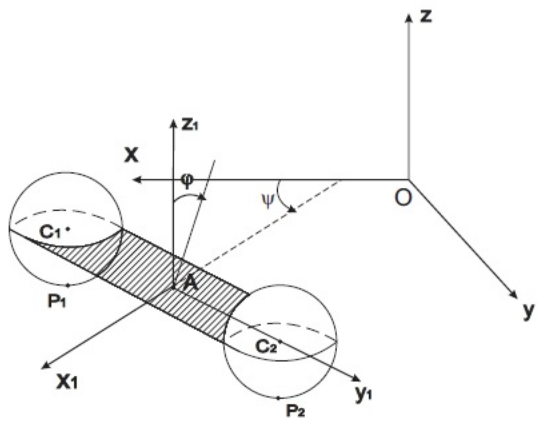
Fig.1. Modern two-wheeled devices: a) Segway, b) Spherical Drive System (CAD model)

Prompt growth of interest in designs with such kinematic scheme confirms relevance of researches and works on this subject, and also gives rise to new variations of similar designs. For example, the team of students of Engineering college of Charles Davidson at San Jose university (USA) developed a peculiar vehicle of the described class. The car received the name Spherical Drive System, at first sight it reminds the motorcycle, though actually it significantly other one because instead of traditional wheels big spheres (Fig. 2b) are established here.

We will set in work the task as follows – we will consider Segway device model, but on spherical wheels. It will allow to increase its maneuverability considerably. In this case, the device will be able to move in any direction on the plane, without changing the orientation. The movement side will allow to pass on narrow paths on which isn't able to pass usual Segway. Such expansion of maneuverability seems especially actual for special structures like the those organizations where technical capabilities of means of equipment have essential value.

2. Robot model on two spherical wheels. Analysis of the motion

We will consider model which schemes are given in Fig. 2. In Fig. 2a the three-dimensional CAD-model, is given in Fig. 2b - the corresponding theoretical-mechanical model where key parameters of model are entered.



a) b)

Fig. 2. The device on spherical wheels: a) CAD-model, b) theoretical-mechanical model

We will determine these parameters in following manner. We will enter coordinates of system as follows - the task of setting of all design in absolute space requires 10 coordinates:

- coordinates x, y of a point of A centers of a platform,
- device course angle ψ,
- a pendulum deviation angle from a vertical φ,
- 3 angles of rotation round the center for the right sphere.
- 3 angles of rotation round the center for the left sphere.

For round their centers we will take the corresponding angles of Euler for angles of rotation of spheres, then the movement of spheres will be described by the known kinematic and dynamic equations.

We will accept numerical values in calculations the following: two spheres of radius of r = 15 cm and masses Msf = 1 kg (wheel) are fastened by a rectangular platform, the sizes 2a = 60 cm at r distance from the plane, and weight Mpl = 500 g on which length pendulum l = 1 m and masses Mst = 500 g is established, possessing one degree of freedom. The platform is attached in such a way that in each timepoint remains is parallel to the plane on which the robot moves.

The described model moves on absolutely rough plane without slipping under the influence of two external moments of $\boldsymbol{N_1}$, $\boldsymbol{N_2}$ which are attached to the centers of the respective spheres.

We will accept that spheres-wheels are affected by forces and the moments in points of an attachment of spheres to a platform, but will consider that they internal. Besides, we will assume that in hinges of fixing of spheres on a platform there is no friction.

Except these forces spheres are affected by forces of contact of $\boldsymbol{F_1}$, $\boldsymbol{F_2}$ enclosed in points of contact of wheels with a basic surface. We will accept a condition that the movement of spheres on a basic surface happens without slipping. In this case the full described dynamic model of system is nonholonomic.

It is known ([1, 2]) that a convenient choice in this situation for drawing up the equations of the movement of system are the equations of the general theorems of dynamics. These equations have an appearance here:

$$\frac{d}{dt}\left(M\vec{V}\right) = \sum \vec{F}_i + \sum \vec{R}_i \ , \\ \frac{d}{dt}\left(J\vec{\Omega}\right) = \sum \vec{M}_i + \sum \left[\vec{r}_i ,\ \vec{R}_i\right], \tag{1}$$

where $\boldsymbol{R_i}$ include forces of impact of support on spheres, forces of impact of a pendulum on the device, the external operating $\boldsymbol{N_i}$ moments enter $\boldsymbol{M_i}$, in particular. If to open all expressions in (1), the system can be given to system of 10 equations on 10 variables, and the task is certain and solvable [3-9].

Further for (1) in the opened form the direct and the inverse problem of dynamics are solved. The direct problem of dynamics is reduced actually to integration of system (1) for the set operating power influences and serves for control of the solution of the inverse task. The inverse task is a finding of the demanded torques for the set trajectories of movements of the device. This task is solvable, is reduced to the solution of the algebraic equations for the operating torques. Then received the decision it is verified by means of a direct problem of dynamics. The inverse problem is effectively solved for cases of the movement of the device on the set of linear trajectories.

For example, we will consider a task of a linear trajectory in a parametrical form:

$$x(t) = t^3/18\,,\ \ y(t) = t^3/18\,,\ \ \psi \equiv 0\,,\ \varphi \equiv 0\ ,$$

i.e. the movement on line $y = x$ with acceleration, the course angle and an angle of a deviation of a pendulum rely identically equal to zero.

For a components of the torques we receive the following solution

$$\begin{cases} N^{x1}{}_1(t) = N^{x1}{}_2(t) \ = \dfrac{11t}{12} \\ N^{y1}{}_1(t) \ = -N^{y1}{}_2(t) \ = -t \end{cases},$$

and the solution graphically looks as follows – trajectories of the centers of wheels of the device are given in Fig. 3 (it is visible that the device carries out "the movement side")

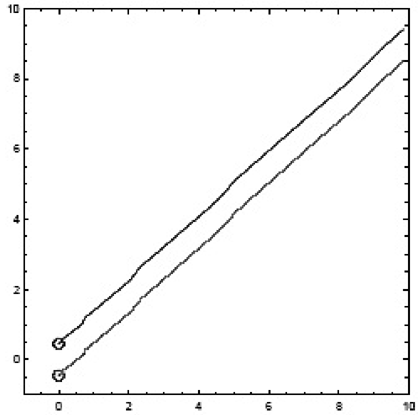


Fig. 3. Trajectories of the centers of wheels

In Fig. 4. the corresponding characteristic of an angle of a deviation of a pendulum from a vertical is shown, on graphics the *sin (φ)* function is constructed since it is the solution of problems of dynamics for this device:

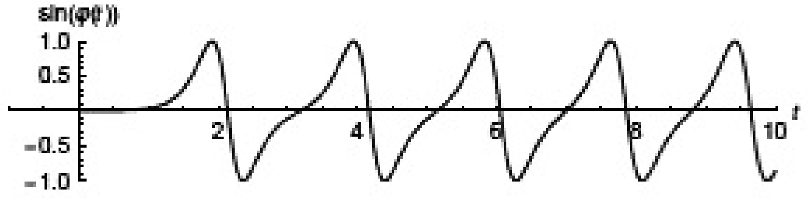


Fig. 4. Graph of function *sin(φ (t))*

We will notice here that, apparently from fig. 4 in this case it isn't possible to hold a pendulum at situation $\varphi = 0$, the pendulum makes comlex oscillating motions. It is connected with that situation $\varphi = 0$ is unstable and demands stabilization. The following section is devoted to this problem. For the rest, the trajectory turned out that which was required in a condition of the inverse task. This result leads to a conclusion about a correctness of the equations of the movement and solutions of the inverse task – i.e. to synthesis of controls of the device.

3. Stabilization of the movements of the device with a pendulum

Ultimate goal of work is creation of management here for the robot which would stabilize the top vertical unstable position of a pendulum. I.e. it is necessary to write out an obvious type of vector functions of $\boldsymbol{N_1}$**,** $\boldsymbol{N_2}$ solving this problem. Stabilization is understood as such control which would do the top position of a pendulum asymptotically stable.

This problem is solved in the small vicinity of a starting point of position of the device on the basis of the linearized equations of the motion of the robot. These equations finally are that

$$\begin{cases} \Delta\ddot{x}(t) = j_1\,\Delta\varphi(t) + i_1\,\Delta N^{y1}{}_1(t) + i_2\,\Delta N^{y1}{}_2(t) \\ \Delta\ddot{y}(t) = i_3\,\Delta N^{x1}{}_1(t) + i_4\,\Delta N^{x1}{}_2(t) \\ \Delta\ddot{\psi}(t) = i_5\,\Delta N^{y1}{}_1(t) + i_6\,\Delta N^{y1}{}_2(t) \\ \Delta\ddot{\varphi}(t) = j_2\,\Delta\varphi(t) + i_7\,\Delta N^{y1}{}_1(t) + i_8\,\Delta N^{y1}{}_2(t) \end{cases} \tag{2}$$

In the equations (2) 10 functions $j_1, j_2, i_1, i_2, i_3, i_4, i_5, i_6, i_7, i_8$ are known functions of parameters of a task. Further, it is possible to show obviously that in such statement the problem of stabilization can be solved by introduction of linear feedback.

For example, simultaneous stabilization on *(φ, x)* it can be solved by means of control on feedback as follows

$$\Delta N^{y1}i = -C_1\Delta\varphi(t) - C_2\Delta\dot{\varphi}(t) - C_3\Delta x(t) - C_4\Delta\dot{x}(t)\,,$$

which coefficients of C_1, C_2, C_3, C_4 can be defined from a condition of asymptotic stability of system, for example on the basis of Rouse-Hurwitz criterion [1].

The example of the solution of a problem of stabilization is given below in Fig. 5 where change of a pendulum deviation angle from a vertical is shown over time as $\varphi(t)$:

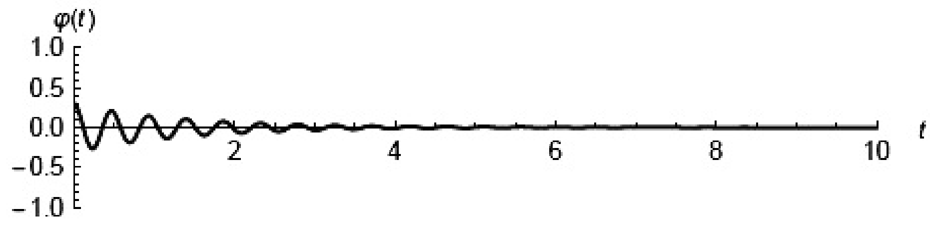


Fig. 5. Graph of an angle of a deviation of a pendulum $\varphi(t)$: $C_1 = 40, C_2 = 1, C_3 = C_4 = -1$

In general also function $x(t)$ change turns out similar:

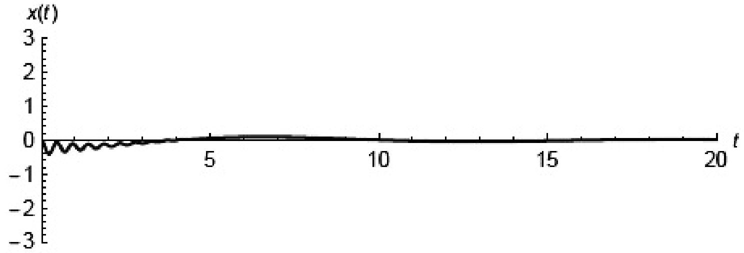


Fig.6. Graph of coordinate $x(t)$: $C_1 = 40$, $C_2 = 1$, $C_3 = C_4 = -1$

As we will note a conclusion that the received results show basic possibility of stabilization of the device with a pendulum.

4. Conclusion

Research of mathematical model of the device representing a Segway-like design with two spherical wheels which cope two independent torques attached to the centers of spheres showed its basic technical feasibility.

This conclusion is based on the following: for the offered design direct and inverse problems of dynamics on various program trajectories are solved. Ability of the device to the motion along any direction on the plane with the fixed (given) orientation is shown.

For the linearized mathematical model the algorithms of control in the form of feedback providing stability of the top position of a pendulum, and also one of linear coordinates are constructed.

Numerical experiments on research of applicability of the received laws of control which showed possibility of their use in full nonlinear model are made.

On the basis of these conclusions the task of development of a technical prototype of the considered robot can be set.

1. Markeev A.P.: Theoretical mechanics: The textbook for universities. Moscow: CheRo, 1999, 572 p. (in russian)
2. Markeev A.P.: Dynamics of the body adjoining to a rigid surface. Publishing house: Institute of computer researches, Izhevsk, 2014, 492 p. (in russian)
3. Alexandrov V. V., Lemak S.S., Parusnikov N. A. Lectures on mechanics of the operated systems: Manual. M.: MAX. Press, 2012. 240 p. (in russian)
4. A. V. Borisov, A. A. Kilin, I. S. Mamayev.: How to operate Chaplygin's sphere by means of rotors // Nonlinear dynamics. 2012. v. 8. No. 2. Page 289-307. (in russian)
5. Belotelov V. N.: Dynamics and control of the independent mobile robot with two coaxial wheels. Dis.... the physical. - math. sciences. Moscow, 2009, 125 pages. (in russian)
6. Formalsky A.M.: Control of unstable objects. M.: Publ.: FIZMATLIT, 2013, 237 p. (in russian)
7. Salerno A., Angeles J.: A new family of two-wheeled mobile robots: modeling and controllability. // IEEE Transactions on Robots, 2007, Vol. 23, No. 1, pp. 169-173.
8. Ranjan Mukherjee, Mark A. Minor, Jay T. Pukrushpan: Motion Planning for a Spherical Mobile Robot: Revisiting the Classical Ball-Plate Problem // Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, DECEMBER 2002, Vol. 124, pp. 502-511
9. Wolfram Stephen.: The mathematica book. ed. Wolfram Media, 2003, 1488 p., http://www.wolfram.com/

В.Е. Павловский, А.М. Толкачев

МОБИЛЬНЫЙ РОБОТ НА ДВУХ ШАРОВЫХ КОЛЕСАХ

ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, МГУ, Москва
vlpavl@mail.ru, anton-t@inbox.ru

Аннотация

В работе рассматривается теоретико-механическая модель двухколесного мобильного робота на шаровых колесах. Основная цель работы – исследование динамики и синтез законов управления движением аппарата по прямолинейным траекториям, и синтез движения в локальной окрестности со стабилизацией вертикального неустойчивого маятника, установленного на платформе аппарата. Модель с маятником является приближенной моделью аппарата с человеком, находящимся (стоящим) на аппарате.

1. Введение

Последнее десятилетие отмечено резким возрастанием интереса к новому семейству двухколесных транспортных средств, содержащих одну колесную пару с закрепленным на ней корпусом. Эти средства возникли как ответ на требования разработки маневренных транспортных средств.

Машины такого типа можно разделить на три группы:

– аппараты без какой-либо стабилизации платформы,
– аппараты с механической стабилизацией платформы,
– аппараты с электронной стабилизацией платформы.

Последние из них, - это наиболее современные аппараты. В 2001 г. было анонсировано новое транспортное средство, разработанное компанией Segway LLC, в котором центр масс корпуса находится выше оси вращения колес. С одной стороны, размещение центра масс выше оси вращения позволило значительно сократить диаметры колес и габариты аппарата, но с другой стороны возникла необходимость стабилизации такой системы, поскольку она является статически неустойчивой. Максимальная скорость роллера невысока — 20 км/час. Роллер готов выдержать хозяина весом до 118 кг, тогда как сам весит 47,7 - 54,4 кг, в зависимости от модели. Запас хода до 39 км. Полная зарядка от домашней розетки занимает 8 часов. Следует отметить, что роллеры Segway стали довольно популярны и находят применение в различных технических сферах. Роллер показан на Рис.1а.

Стремительный рост интереса к конструкциям с такой кинематической схемой подтверждает актуальность исследований и работ по этой тематике, а также рождает новые вариации подобных конструкций. Например, команда студентов Инженерного колледжа Чарльза Дэвидсона при университете Сан-Хосе (США) разработала своеобразное транспортное средство описываемого класса. Машина получила название Spherical Drive System, на первый взгляд она напоминает мотоцикл, хотя на самом деле это нечто существенно большее, потому что вместо традиционных колес здесь установлены большие сферы (Рис.2б).


а)

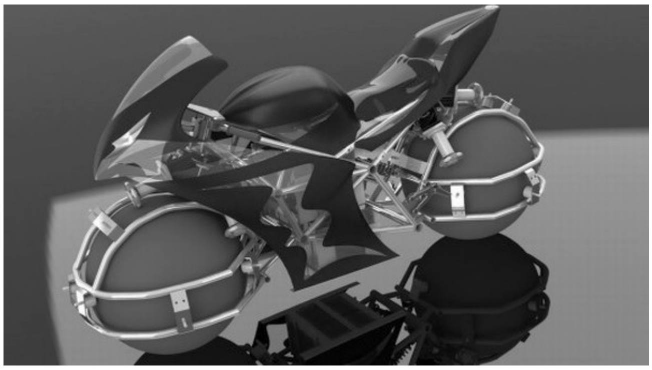
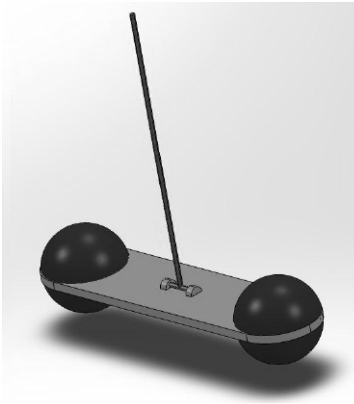

б)

Рис.1. Современные двухколесные аппараты а) Segway, б) Spherical Drive System (CAD модель)

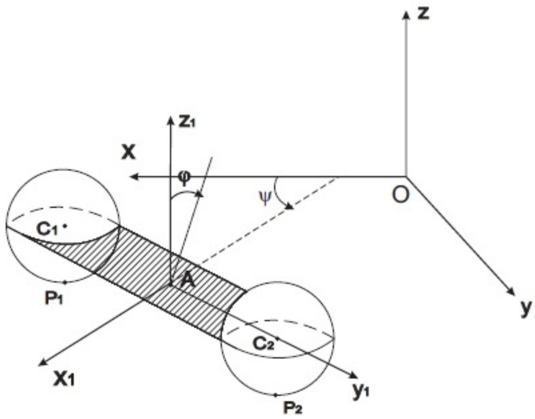
Поставим в работе задачу следующим образом – рассмотрим модель аппарата типа Segway, но на шаровых колесах. Это позволит значительно увеличить его маневренность. В этом случае, аппарат сможет двигаться в любом направлении на плоскости, не изменяя своей ориентации. Движение боком позволит проезжать по узким дорожкам, по которым обычный Segway проехать не в состоянии. Такое расширение маневренности видится особенно актуальным для специальных структур типа силовых организаций, где технические возможности средств оснащения имеют существенное значение.

2. Модель робота на двух шаровых колесах. Анализ движения

Рассмотрим модель, схемы которой приведены на рис.2. На рис.2а приведена трехмерная CAD-модель, на Рис.2б - соответствующая теоретико-механическая модель, где введены основные параметры модели.



а)



б)

Рис.2. Аппарат на шаровых колесах: а) CAD-модель, б) теоретико-механическая модель

Эти параметры определим таким образом. Координаты системы введем следующим образом - для задания положения всей конструкции в абсолютном пространстве требуется 10 координат:

- координаты *x, y* точки *A* центра платформы,
- угол курса аппарата ψ,
- угол отклонения маятника от вертикали φ,
- 3 угла поворота вокруг центра для правой сферы.
- 3 угла поворота вокруг центра для левой сферы.

За углы поворота сфер вокруг их центров примем соответствующие углы Эйлера, тогда движение сфер будет описываться известными кинематическими и динамическими уравнениями.

Численные значения в расчетах будем принимать следующими: две сферы радиуса *r = 15 см* и массы *Мсф = 1 кг* (колеса) скреплены прямоугольной платформой, размерами *2a = 60 см* на расстоянии *r* от плоскости, и массой *Мпл = 500 г* , на которой установлен маятник длины *l = 1 м* и массы *Мст = 500 г* , обладающий одной степенью свободы. Платформа прикреплена таким образом, что в каждый момент времени остается параллельна плоскости, по которой двигается робот.

Описанная модель движется по абсолютно шероховатой плоскости без проскальзывания под действием двух внешних моментов $\boldsymbol{N_1}, \boldsymbol{N_2}$, которые приложены к центрам соответствующих сфер.

Примем, что на сферы-колеса действуют силы и моменты в точках прикрепления сфер к платформе, но учтем, что они внутренние. Кроме того, примнем, что в шарнирах закрепления сфер на платформе нет трения.

Кроме этих сил на сферы действуют силы контакта $\boldsymbol{F_1}, \boldsymbol{F_2}$, приложенные в точках контакта колес с опорной поверхностью. Примем условие, что движение сфер по опорной поверхности происходит без проскальзывания. В этом случае полная описанная динамическая модель системы оказывается неголономной.

Известно ([1, 2]), что удобным выбором в этой ситуации для составления уравнений движения системы являются уравнения общих теорем динамики. Эти уравнения здесь имеют вид:

$$
\begin{aligned}
&\frac{d}{dt}\left(M\vec{V}\right)=\sum\vec{F}_i+\sum\vec{R}_i\ ,\\
&\frac{d}{dt}\left(J\vec{\Omega}\right)=\sum\vec{M}_i+\sum\left[\vec{r}_i,\ \vec{R}_i\right],
\end{aligned}
\tag{1}
$$

где в $\boldsymbol{R_i}$ входят силы воздействия опор на сферы, силы воздействия маятника на аппарат, в $\boldsymbol{M_i}$ входят, в частности, внешние управляющие моменты $\boldsymbol{N_i}$. Если раскрыть все выражения в (1), система может быть приведена к системе 10 уравнений на 10 переменных, и задача оказывается определенной и разрешимой [3-9].

Далее для (1) в раскрытой форме решены прямая и обратная задача динамики. Прямая задача динамики сводится фактически к интегрированию системы (1) для заданных управляющих силовых воздействий и служит для контроля решения обратной задачи. Обратная задача – это нахождение требуемых управлений для заданных траекторий движений аппарата. Задача эта разрешима, сводится к решению алгебраических уравнений на управляющие моменты. Затем полученной решение верифицируется с помощью прямой задачи динамики. Обратная задача эффективно решается для случаев движения аппарата по заданным прямолинейным траекториям.

Например, рассмотрим задание прямолинейной траектории в параметрическом виде:

$$x(t) = t^3/18\,,\ \ y(t) = t^3/18\,,\ \ \psi \equiv 0\,,\, \varphi \equiv 0\ ,$$

т.е. движение по прямой $y = x$ с ускорением, курсовой угол и угол отклонения маятника полагаются тождественно равными нулю.

Для компонент моментов получаем следующее решение

$$\begin{cases} N^{x1}{}_1(t) = N^{x1}{}_2(t) \ = \dfrac{11t}{12} \\ N^{y1}{}_1(t) \ = -N^{y1}{}_2(t) \ = -t \end{cases},$$

а само решение графически выглядит следующим образом – на Рис.3 приведены траектории центров колес аппарата (видно, что аппарат выполняет "движение боком")

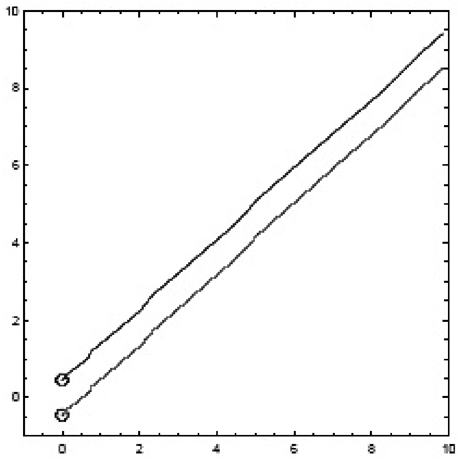


Рис.3. Траектории центров колес

На Рис.4. показана соответствующая характеристика угла отклонения маятника от вертикали, на графике построена функция *sin(φ)*, т.к. она является решением задач динамики для данного аппарата:

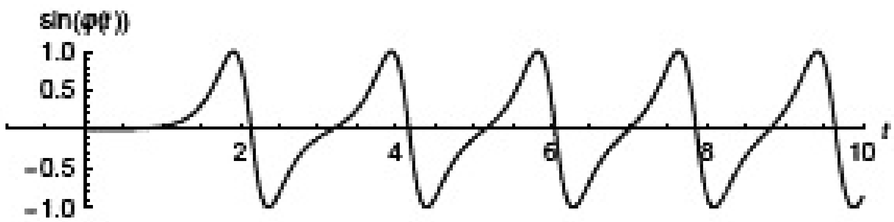


Рис.4. График функции *sin(φ(t))*

Заметим здесь, что, как видно из рис.4 в этом случае не удается удержать маятник у положения $\varphi = 0$, маятник совершает сложные колебательные движения. Это связано с тем, что положение $\varphi = 0$ является неустойчивым и требует стабилизации. Этой проблеме посвящен следующий раздел. В остальном же, траектория получилась той самой, которая требовалась в условии обратной задачи. Этот результат приводит к выводу о корректности уравнений движения и решений обратной задачи – т.е. синтезу управлений аппаратом.

3. Стабилизация движения аппарата с маятником

Конечной целью работы здесь является построение управления для робота, которое бы стабилизировало верхнее вертикальное неустойчивое положение маятника. Т.е. необходимо выписать явный вид вектор-функций $\boldsymbol{N_1}$, $\boldsymbol{N_2}$, решающих эту задачу. Под стабилизацией понимается такое управление, которое делало бы верхнее положение маятника асимптотически устойчивым.

Эта задача решается в малой окрестности исходной точки положения аппарата на основе линеаризованных уравнений движения робота. Уравнения эти в конечном итоге таковы

$$
\begin{cases}
\Delta\ddot{x}(t) = j_1\,\Delta\varphi(t) + i_1\,\Delta N^{y1}{}_1(t) + i_2\,\Delta N^{y1}{}_2(t) \\
\Delta\ddot{y}(t) = i_3\,\Delta N^{x1}{}_1(t) + i_4\,\Delta N^{x1}{}_2(t) \\
\Delta\ddot{\psi}(t) = i_5\,\Delta N^{y1}{}_1(t) + i_6\,\Delta N^{y1}{}_2(t) \\
\Delta\ddot{\varphi}(t) = j_2\,\Delta\varphi(t) + i_7\,\Delta N^{y1}{}_1(t) + i_8\,\Delta N^{y1}{}_2(t)
\end{cases} \tag{2}
$$

В уравнениях (2) 10 функций $j_1, j_2, i_1, i_2, i_3, i_4, i_5, i_6, i_7, i_8$ являются известными функциями параметров задачи. Далее, можно очевидно показать, что в такой постановке задача стабилизации может быть решена введением линейной обратной связи.

Например, одновременная стабилизация по *(φ, x)* может быть решена с помощью управления по обратной связи вида

$$\Delta N^{y1} i = -C_1\Delta\varphi(t) - C_2\Delta\dot{\varphi}(t) - C_3\Delta x(t) - C_4\Delta\dot{x}(t)\,,$$

коэффициенты которой C_1, C_2, C_3, C_4 могут быть определены из условия асимптотической устойчивости системы, например на основе критерия Рауса-Гурвица [1].

Пример решения задачи стабилизации приведен ниже на рис.5, где показано изменение со временем угла отклонения маятника от вертикали $\varphi(t)$:

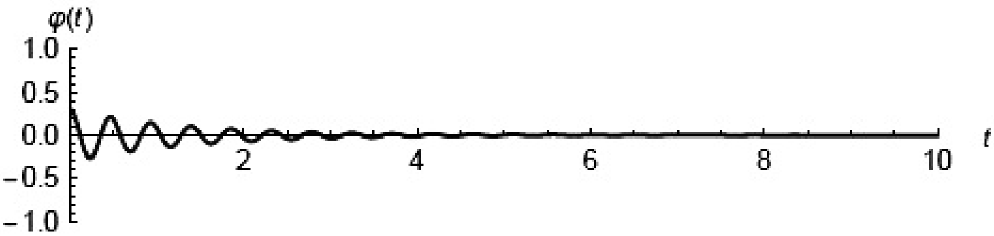


Рис.5. График угла отклонения маятника $\varphi(t)$: $C_1 = 40, C_2 = 1, C_3 = C_4 = -1$

В целом аналогичным получается и изменение функции $x(t)$:

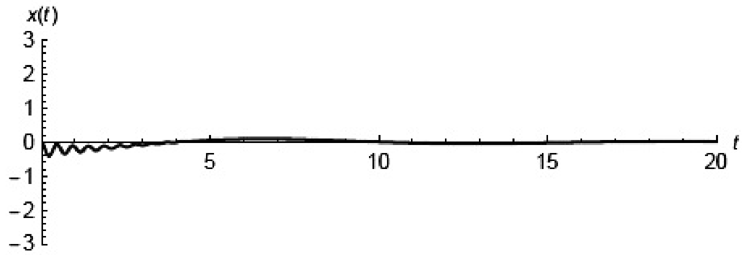


Рис.6. График координаты $x(t)$: $C_1 = 40, C_2 = 1, C_3 = C_4 = -1$

Как вывод отметим, что полученные результаты показывают принципиальную возможность стабилизации аппарата с маятником.

4. Заключение

Исследование математической модели аппарата, представляющего собой Segway-подобную конструкцию с двумя сферическими колесами, которые управляются двумя независимыми моментами, приложенными к центрам сфер, показало ее принципиальную техническую осуществимость.

Этот вывод основывается на следующем: для предложенной конструкции решены прямая и обратная задачи динамики на различных программных траекториях. Показана способность аппарата к движению вдоль произвольного направления на плоскости с фиксированной заданной ориентацией.

Для линеаризованной математической модели построены алгоритмы управления в виде обратной связи, обеспечивающие устойчивость верхнего положения маятника, а также одной из линейных координат.

Проведены численные эксперименты по исследованию применимости полученных законов управления, которые показали возможность их использования в полной нелинейной модели.

На основе этих выводов может быть поставлена задача разработки технического прототипа рассмотренного робота.

1. Маркеев А.П.: Теоретическая механика: Учебник для университетов. Москва: ЧеРо, 1999, 572 стр.

2. Маркеев А.П.: Динамика тела, соприкасающегося с твердой поверхностью. Изд-во: Институт компьютерных исследований, Ижевск, 2014, 492 стр.
3. Александров В.В., Лемак С.С., Парусников Н.А.: Лекции по механике управляемых систем: Учебное пособие. М.: МАКС Пресс, 2012. 240 с.
4. А.В.Борисов, А.А.Килин, И.С.Мамаев.: Как управлять шаром Чаплыгина при помощи роторов // Нелинейная динамика. 2012. Т. 8. № 2. С. 289–307.
5. Белотелов В.Н.: Динамика и управление автономным мобильным роботом с двумя соосными колесами. Дис. ... канд. физ.-мат.. наук. Москва, 2009, 125 с.
6. Формальский А.М.: Управление движением неустойчивых объектов. М.: Изд: ФИЗМАТЛИТ, 2013, 237 стр.
7. Salerno A., Angeles J.: A new family of two-wheeled mobile robots: modeling and controllability. // IEEE Transactions on Robots, 2007, Vol. 23, No. 1, pp. 169-173.
8. Ranjan Mukherjee, Mark A. Minor, Jay T. Pukrushpan: Motion Planning for a Spherical Mobile Robot: Revisiting the Classical Ball-Plate Problem // Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, DECEMBER 2002, Vol. 124, pp. 502-511
9. Wolfram Stephen.: The mathematica book. ed. Wolfram Media, 2003, 1488 p., http://www.wolfram.com/

Ry. Prakapovich

SPHERICAL MOBILE ROBOT OF ZERO RADIUS TURNING

UIIP, Minsk Belarus
rprakapovich@robotics.by

Г.А. Прокопович

СФЕРИЧЕСКИЙ МОБИЛЬНЫЙ РОБОТ С НУЛЕВЫМ РАДИУСОМ ПОВОРОТА

Объединённый институт проблем информатики НАН Беларуси, г. Минск
rprakapovich@robotics.by

Введение

В последнее время большое внимание уделяется исследованиям и разработкам в области мобильной робототехники, которая помимо промышленной и космической сфер всё больше используется в военном деле и службами специального назначения. Совершенно новым направлением для мобильной робототехники является социальная сфера, для которой создаются сервисные и домашние роботы [1].

На данный момент среди актуальных задач в области мобильной робототехники остаётся создание не только качественных систем управления, в которых всё чаще используются технологии искусственного интеллекта, но надёжных и эффективных способов и механизмов передвижения самих роботов. Это связано с тем, что даже наиболее часто используемые на данный момент мобильные роботы, оснащённые колёсной рамой с двумя и более колёсами, обладают своими недостатками. К можно отнести трудности передвижения по пересечённой местности, ненулевой радиус поворота и наличие зазоров между вращающимися осями и неподвижными частями корпуса.

Одним из перспективных способов преодоления указанного недостатка является создание шагающих и прыгающих мобильных роботов [2], а также роботов с шарообразными корпусами [3]. Причём все механизмы и система управления у последних находятся в герметичных сферических оболочках, что обеспечивает им дополнительную защиту и позволяет самому роботу передвигаться как по твёрдой поверхности, так и по жидким и вязким средам без перехода на другой движитель.

1. Анализ конструкционных и кинематических особенностей сферических роботов

По способу создания вращающего момента внешнего корпуса все известные модели сферических роботов можно разделить на четыре различные группы:

1) использующие законченные самоходные колёсные шасси, помещённые в гладкий сферический корпус, которые имеют, в основном, от 1 до 4-х колёс [4,5], включая всенаправленные [6];

2) использующие различные приводные механизмы, позволяющие в некоторых пределах смещать центр масс всего робота относительно геометрического центра его сферического корпуса, что нарушает равновесие и заставляет его вращаться вокруг главной или вспомогательных осей, на которые установлены указанные приводные механизмы [7-9];

3) использующие переменный гиростатический момент, создаваемый с помощью набора различных маховиков, жёстко зафиксированных на внутренней поверхности сферического корпуса, противодействие которому заставляет робота вращаться [10-12];

4) использующие различные толкательные элементы, равномерно установленные на поверхности сферического корпуса, поступательные движения которых заставляют его отталкиваться от поверхности и тем самым катиться [13,14];

5) использующие механизмы деформации формы сферического корпуса [15].

Следует отметить, что для реализации каждого из указанных способов движения сферических роботов требуется разработка не только уникальных приводных механизмов, но и соответствующих им систем и алгоритмов управления.

2. Недостатки известных типов сферических роботов

Однако, несмотря на своё большое разнообразие, все известные модели сферических мобильных роботов [3-15] в той или иной степени имеют общие недостатки, как низкая манёвренность и малая эффективность движения, которые, в основном, вызваны следующими причинами:

1) смещаемый центр масс сферического мобильного робота описывает вокруг геометрического центра корпуса только сферу либо некоторую её часть, что не позволяет в широких пределах регулировать величину вращающего момента, а в случае неполной описывающей сферы появляется ещё и ненулевой радиус поворота;

2) собственная масса используемых движителей и другой полезной нагрузки не всегда используется непосредственно при управляемом переносе центра масс всего робота, так как их центр масс совместно с другими неподвижными элементами конструкции совпадает с геометрическим центром сферического корпуса, а смещение центра масс всего робота реализуется за счёт использования дополнительных грузов-балластов;

3) информационные и силовые каналы, которые необходимы для функционирования движителей и различных электронных компонентов системы управления, установленных на подвижных элементах приводных механизмов, в большинстве случаях, вынуждены передаваться при помощи скользящих электропроводящих контактов, что значительно усложняет конструкцию;

4) как правило, в процессе движения (качения) сферического робота по горизонтальной или наклонной поверхности не реализуется накопление и дальнейшее использование его собственной приобретённой кинетической энергии.

Также следует указать, что одной из главных и пока ещё полностью не решённых проблем для сферических роботов является выбор типа и способа установки сенсорных датчиков, которые позволят им эффективно ориентироваться в пространстве и выполнять полезные функции.

Для преодоления указанных недостатков в данной работе описываются результаты проведённых исследований по созданию сферических самоходных шасси, которые будут обладать возможностью всенаправленного движения с нулевым радиусом поворота, а также большой степенью рекуперации механической энергии, что позволит создавать мобильные роботы с достаточно большим временем автономной работы. В результате был предложен механизм, в котором реализуется принципиально новый способ смещения центра тяжести мобильного робота относительно его геометрического центра.

3. Новый способ смещения центра масс сферического робота

Поставленная задача была решена благодаря выдвинутому предположению, что практически вся масса робота, кроме его оболочки, должна участвовать в управляемом смещении центра масс всего робота [16]. В результате, движители, элементы питания, блок системы управления и другая полезная нагрузка были представлены как рабочий орган параллельного манипулятора. Механизмы параллельной кинематики, исполнительные звенья которых соединяются с основанием с использованием нескольких независимых кинематических цепей, обладают такими преимуществами, как повышенная точность, обусловленная их параллельной структурой; жесткость; надежность; возможность манипулировать большими нагрузками [17].

На Рис. 1 приведено схематическое изображение предложенного сферического робота, который состоит из корпуса, выполненного в виде полой сферы, и параллельного манипулятора, состоящего из радиально расположенных звеньев. Причём, звенья манипулятора соединены с внутренней поверхностью корпуса и рабочим органом шарнирами.

Мобильный робот содержит корпус, который состоит из двух соединённых между собой полусфер, радиально установленные звенья 2.1-2.4, концы которых соединены с шарнирами 3.1-3.4. Шарниры закреплены на внутренней поверхности корпуса 1 и рабочем органе 4. Рабочий орган 4 содержит блок управления, блок питания, систему приводов, сенсорную систему, коммуникационную систему и грузовой отсек (на Рис. не показаны). Параллельный манипулятор состоит из звеньев 2.1-2.4 и шарниров 3.1-3.4.

Опишем принцип работы предложенного способа передвижения центра масс сферического робота. До начала движения рабочий орган 4 расположен в нижней части корпуса 1 таким образом, чтобы центр тяжести робота-шара находился ниже геометрического центра сферического корпуса, что позволит роботу находиться в устойчивом стационарном положении (Рис. 2*а*). Для осуществления движения робота в выбранном направлении непосредственно или дистанционно на систему приводов подаются управляющие сигналы, которые приводят в движение звенья 2.1-2.4, т.е. длина звеньев 2.1-2.4 начинает согласованно изменяться и приводит к управляемому смещению рабочего органа 4. В результате, центр тяжести всего робота из стационарного положения перемещается в требуемую сторону движения (Рис. 2 *б*).

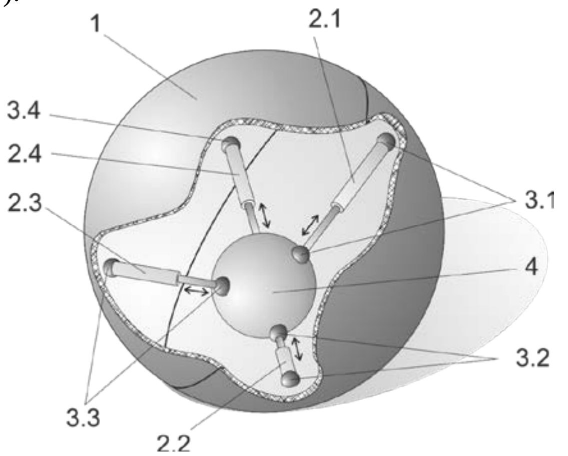


Рис. 1. Предложенный механизм передвижения сферического робота

В результате, появляется вращающий момент относительно геометрического центра сферического корпуса в ту сторону, куда отклонился рабочий орган 4, и корпус 1 робота-шара начинает вращаться. После того, как центр тяжести робота-шара опять достигнет стационарного положения производится очередное смещение рабочего органа 4 в требуемое направление движения. Так, управляемое перемещение рабочего органа 4 параллельного манипулятора приводит робот-шар в непрерывное движение по любой заданной траектории.

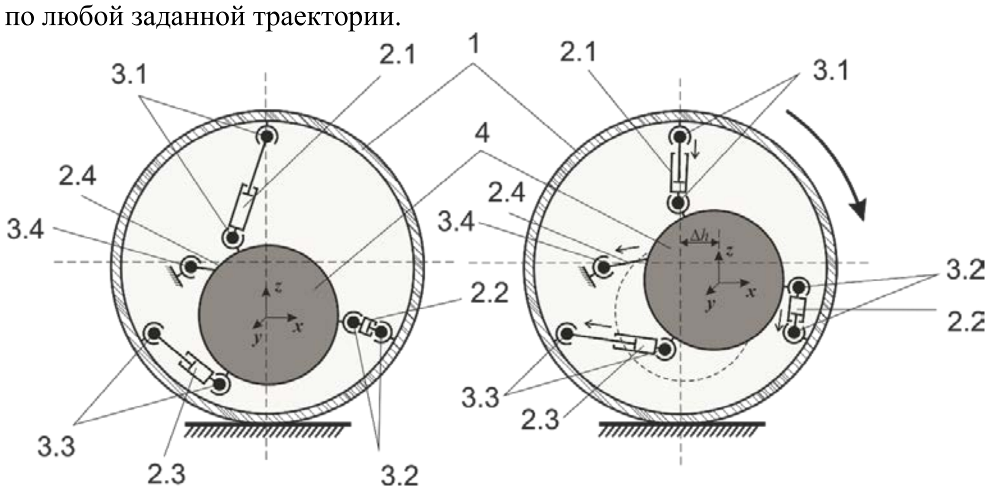


Рис. 2. Процесс смещения центра масс робота относительно геометрического центра его сферического корпуса

Кинематические цепи звеньев манипулятора сферического робота могут состоять из поступательных или вращательных пар. Число звеньев у параллельного манипулятора может быть различным. Каждое звено управляется одним приводом, который объединён с рабочим органом либо установлен на внутренней поверхности корпуса, что существенно повышает динамику и точность позиционирования рабочего органа внутри корпуса робота-шара. Замкнутая кинематическая цепь параллельного манипулятора обеспечивает высокую жесткость всей конструкции. Так как нагрузка рабочего органа разделяется между приводами, параллельный манипулятор способен обеспечить высокую грузоподъемность, что позволит в рабочем органе разместить большое количество бортового оборудования.

Благодаря тому, что параллельный манипулятор способен перемещать центр масс робота в пределах внутренней полости корпуса робота, то ускоренное линейное перемещение рабочего органа может создавать импульс, который позволит роботу-шару поступательно двигаться в заданном направлении. Данные свойства будут полезны для преодоления препятствий на пути робота с помощью прыжков.

4. Кинематика предложенного параллельного манипулятора

Для обеспечения своих функциональных назначений параллельный манипулятор должен обладать минимум тремя поступательными степенями свободы. Широко известны схемы механизмов параллельной кинематики типа «трипод» и «гексапод», которые позволяют обеспечить три поступательные и три вращательные степени свободы подвижной платформы относительно неподвижного основания. Однако, указанные механизмы должны содержать 15 и 12 шарниров соответственно, что значительно усложняет всю конструкцию. В связи с этим, для упрощения конструкции, а также обеспечения симметричного распределения массы по объёму корпуса сферического робота было предложено использовать манипулятор с четырьмя независимыми кинематическими парами.

Предложенный манипулятор представляет собой механизм (рис. 3) с параллельной кинематикой типа «квадропод», который состоит из неподвижного основания, представляющего собой внутреннюю поверхность сферического корпуса, четырёх штанг, каждая из которых состоит из двух стержней и активной поступательной пары (привода), а также подвижной рамки, являющейся основой для крепления рабочего органа. Для упрощения конструкции и дальнейших вычислений будем считать, что концы штанг крепятся в вершинах двух тетраэдров *abcd* и *ABCD*. Причём размер большего тетраэдра*ABCD* ограничивается радиусом описывающего его сферического корпуса.*A*, *B*, *C*, *D*, *a*, *b*, *c*– сферические шарниры; *d* – шарнир Гука; 1, 2, 3, 4 – поступательные кинематические пары.

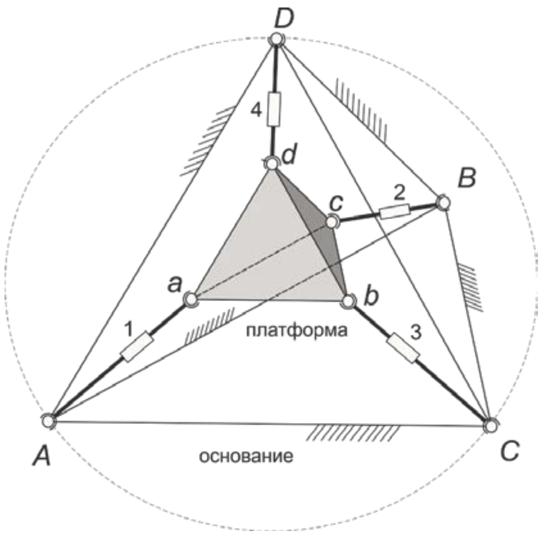


Рис. 3. Схема квадропода с тремя поступательными степенями подвижности

Для оценки степеней свободы *W* полученного механизма воспользуемся известными формулами Грюблера и Сомова-Малышева. Формула Грюблера имеет вид

$$W_Г = \lambda\left(k - p - 1\right) + \sum_{i=1}^{p} d_i \;, \qquad (1)$$

где $W_Г$ – число подвижностей механизма (управляемых параметров); λ – число степеней свободы твёрдого тела в пространстве; k – количество звеньев механизма (включая одно неподвижное звено — основание); p – общее количество подвижных соединений звеньев, не рассматривая количество степеней свободы этих соединений; d_i – число степеней свободы каждого из соединений.

Для квадропода, представленного на рис. 3, λ=6, k=9, p=12, d_1,d_2,d_3,d_4=1 (поступательные кинематические пары), d_5=2 (шарнир Гука), $d_6,d_7,d_8,d_9,d_{10},d_{11},d_{12}$=3 (сферические шарниры). В результате

$$W_Г = 6\left(9 - 12 - 1\right) + 3 \cdot 7 + 2 \cdot 1 + 1 \cdot 4 = -24 + 21 + 2 + 4 = 3\,. \qquad (2)$$

Формула Сомова-Малышева имеет вид

$$W_{СМ} = \lambda n - \sum_{i=1}^{\lambda-1} \left(\lambda - i\right) p_i \;, \qquad (3)$$

где λ – число степеней свободы твёрдого тела в пространстве; n – число подвижных звеньев механизма; p_i– число подвижных кинематических пар, имеющих степень подвижности i. В результате, так же, как по формуле Грюблера (1), число степеней свободы равняется

$$W_{CM} = 6\cdot 8 - 5\cdot 4 - 4\cdot 1 - 3\cdot 7 = 48 - 20 - 4 - 21 = 3. \quad (4)$$

Таким образом, привода поступательного перемещения четырёх звеньев в предложенном механизме способны обеспечивать соответствующее поступательное перемещения рабочего органа по трём координатным осям.

Заключение

Рассмотрены преимущества и недостатки известных конструкций мобильных сферических роботов, а также механизмов их передвижения. Предложен оригинальный способ передвижения сферического робота, который заключается в смещении центра масс всего робота относительно геометрического центра его сферического корпуса с помощью параллельного манипулятора, состоящего из радиально расположенных звеньев. Причём, звенья манипулятора соединены с внутренней поверхностью корпуса и рабочим органом шарнирами.

Преимуществом предложенного мобильного робота является то, что благодаря всенаправленному перемещению рабочего органа внутри полого сферического корпуса, обеспечивается исключительная подвижность и маневренность, и он способен быстро изменить направление движения с нулевым радиусом разворота.

1. Юревич, Е.И. Основы робототехники: учеб. пособие / Е.И. Юревич. – 3-е изд., перераб. и доп. − СПб.: БХВ-Петербург, 2010. − 368 с.
2. Волкова, Л.Ю. Изучение закономерностей движения прыгающего робота при различных положениях точки закрепления ноги / Л.Ю. Волкова, С.Ф. Яцун // Нелинейная динамика. – 2013. – Т. 9. – №2. – С. 327–342.
3. Chase, R. Review of Active Mechanical Driving Principles of Spherical Robots / R. Chase, A.A. Pandya //Robotics. – 2012. – Vol. 1. – Pp. 3-21.
4. Self-propelleddevicewithactivelyengageddrivesystem :USPatent 8571781 B2, Int. Cl. B63H21/17 / Ian H. BERNSTEIN, Adam Wilson ; Ass. Orbotix, Inc. – US 13/342,853 ;Filed 03.01.2012 ; Publ. 12.10.2013.
5. Two-way operating ball enclosed vehicl:US Patent 4471567 A, Int. Cl. A63H 33/005 / John E. Martin ; Ass. Martin John E. – US 06/448,421 ; Filed 10.12.1982 ; Publ. 18.09.1984.
6. Караваев, Ю.Л. Динамикасферороботасвнутреннейомниколеснойплатформой/ Ю.Л. Караваев, А.А. Килин// Нелинейнаядинамика. – 2015. – Т. 11. –№1. – С. 187–204.
7. Spherical walking robot : US Patent 7726422 B2, Int. Cl. B6 2 D 57/02, B25J 17/00 / Hanxu Sun, QingxuanJia ; Ass. Beijing University Of Posts & Telecommunications. – US 11/675,128 ; Filed 15.02.2007 ; Publ. 01.06.2010.
8. Ball robot :US Patent 8099189, Int. Cl. A63H 11/00, B25J 5/00 / V.Kaznov, F. Bruhn, P. Samuelsson, L.Stenmark ; Ass. Rotundus Ab. – US 11/666,421 ; Filed 01.11.2005 ; Publ. 17.01.2012.
9. Иванова, Т.В. Динамика и управление сферическим роботом с осесимметричным маятниковым приводом / Т.Б.Иванова, Е.Н. Пивоварова // Нелинейная динамика. – 2013. – Т. 9. – №3. – С. 507–520.
10. Autonomous rolling robot :USPatent 6414457 B1, Int. Cl. A63H 33/00, B25J 5/00 / Sunil K. Agrawal, Shourov Bhattacharya ; Ass. The University Of Delaware. – US 09/640,027 ; Filed 16.08.2000 ; Publ. 02.07.2002.
11. Робот-шар :пат. 2315686 Рос. Федерация, МПКB25J9/00, B25J11/00 / Л.ИНадеина ; заявитель ГОУ ВПО Московский государственный технологический университет «СТАНКИН». – №2005125024/02 ;заявл. 20.02.2007 ;опубл. 27.01.2008.
12. Azizi, M.R. Robust Sliding Mode Trajectory Tracking Controller for a Nonholonomic / M.R. Azizi, J. Keighobadi // Preprints of the 19th World Congress The International Federation of Automatic Control. – Cape Town, South Africa (August 24-29, 2014). – 2014. – Pp. 4541-4546.
13. Robotic rolling vehicle apparatus and method :US Patent 7490681 B2, Int. Cl. B62D 57/00 / James J. Troy ; Ass. The Boeing Company. – US 11/951,728 ; Filed 06.12.2007 ; Publ. 17.02.2009.
14. Multiple leg tumbling robot :US Patent 7327112 B1, Int. Cl. B25J 19/0091, B62D 57/02 / A.G. Hlynka, C.G. Hlynka ; Ass. A.G. Hlynka, C.G. Hlynka. – US 11/369,071 ; Filed 06.03.2006 ; Publ. 05.02.2008.
15. Matsumoto, Y. Rolling Locomotion of a Deformable Soft Robot with Built-in Power Source / Y. Matsumoto, H. Nakanishi, S. Hirai // Proc. 11th Int. Conf. Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines. – Coimbra, Portugal, 2008. – Pp.365-372.

16. Прокопович, Г.А. Рекуперация энергии в мобильных робототехнических устройствах / Г.А. Прокопович // Наука и технология как основы модернизации для будущего устойчивого развития : мат. научн.-техн. конф. (18-21 сент. 2014 г., Минск). – Минск, 2014. – С. 39-40.
17. Merlet,J.P. Parallel Robots(Second Edition)/ J.P. Merlet. –Series: Solid Mechanics and Its Applications, Vol. 128. – Springer. – 2006. – 401.

V.V. Chernyshev, V.V. Arykantsev

UNDERWATER WALKING DEVICE МАК-1*

Volgograd State Technical University, Russia,
dtm@vstu.ru

Introduction

Investigation and industrial exploration of sea bottom resources is impossible without special technical equipment. Important role among machines for sea bottom exploration is assigned to the ground devices, which equipped with mining and geological prospecting working limbs as rippers, buckets, pickers, barrows, ground pumps etc. Practice of underwater engineering work is also sets some tasks, connected with holding of ground work (alignment of squares on the bottom, washing out of trenches and cables, closing them by soil etc.). That works is tiresome, it requires significant power of used machines and created by them tractional forces on the working instrument during the work. As vehicles for the bottom moving machines with track and wheel movers are already being used. However, exploitation conditions, which characterized by low-bearing capability of the soil and rough surface of the bottom, makes unusable the traditional types of movers. More suitable for using in conditions of sea bottom are walking movers, which have a better ground and shape passability. Walking machines are also have lesser costs of tractional forces on movement resistance — for them, in contrast of wheel and track, soil is not obstacle for moving, it requires only costs of power for pressing [1].

In Volgograd State Technical University in Faculty of Transport Complexes and Weaponry Systems series of walking machines was developed [2, 3]. More of them was tested in real terrain conditions. Moreover, there is practical experience of using of the walking machines on bottom ground. The walking robot «Octopus» was participated in experiments on elimination of emergency oil spillage in waterlogged pond and in repairing work in water storage of Volshzky nitrogen-oxygen factory, filled with silt precipitate [3].

With that, design of walking mover of cycle type of the robot «Octopus», which is not have the changing of step parameters, significantly restrained abilities on investigating of mover design features influence on energy efficiency of mover and passableness on underwater ground. Moreover, high weight of the robot (about 5 t.) restrained his mobility during experiments in extreme conditions (in delivery to experiment place meaning). Therefore, in VSTU in cooperation with CDB «Titan», modular hardware system has been developed, it intended for walking mechanism parameter optimization and development of energy efficient gait cycle of mobile robotic systems prototypes with walking mover. On its base hexapod walking device MAK-1 was developed, it designed for the work on small deeps. Design features of the walking device and some results of its underwater tests are discussed in the paper.

Design features of the MAK-1 walking device

Constructively device includes completely bound walking limbs (walking modules) of right and left side (Fig. 1). Frame, which links walking limbs between ones, is exchangeable. Its design can be changed in dependence of required additional equipment. Walking limbs are designed as bearing pieces, equipped with on-board power electrical drive with fixed walking mover on it. On-board electrical drives designed as separate power blocks (power modules), placed in water resistant boxes. Drive power executed via cable from external stand-alone power supply (gasoline power generator) or common power line. Total power of on-board drives is about 2 kW. There is opportunity to smooth changing of velocity. Weight of the device is about 150 kg. Maximum velocity on the ground 3-5 km/h, under water is about 1 km/h. Device can work on deeps less than 20 m. Modular technology, which used in MAK-1 device design, allows to easily upgrade it to special task.

Walking movers of the device are cycle type, with opportunity to adjust the trajectory of datum points. Walking mechanisms are cycled (walking mechanisms of Umnov-Chebyshev have been used), on the base of quadruped flat mechanisms with jointly fixed foots (Fig. 2). Foots could be changed (ski-shaped and small,

* Research executed with financial support of Russian Found of Fundamental Research, projects № 13-08-01144-а, 15-08-10166-к, 15-41-02451 р_поволжье_а.

rounded). It is possible to move without foots (the design of supporting points of walking mechanisms is adapted to interaction with ground).

Mover consists of 3 walking mechanisms (Fig. 2), cycle type, cinematically completely bound and work in antiphase (2 walking mechanisms works in inphase, middle in antiphase). In result at each moment at least one of walking mechanisms is in a contact with ground, thus, coefficient of the mode of this mover is equal to 1. Using of cycle mover allows to don't care about walk save and stability and excludes necessity in controlled adapting system. In result machines have minimal number of the controlled degree of freedom and becomes significantly simpler and cheaper of analogues with adaptive drive. Tests of experimental units of walking machines with cycle movers shows, that they are different by simplicity and reliability and can effectively work in extreme situations [3–5]. With that, the modeling of the dynamics of typical cases of cycle walking machines movement shows, that for total realization of their abilities on shape passableness and maneuverability the ability to combine and adjust the programmed leg moves is necessary. For example, changing of step length before obstacle for better foot position providing, increasing of step high during salient obstacle passage, leg combining during turning for decreasing of the turning resistance moment etc**.**

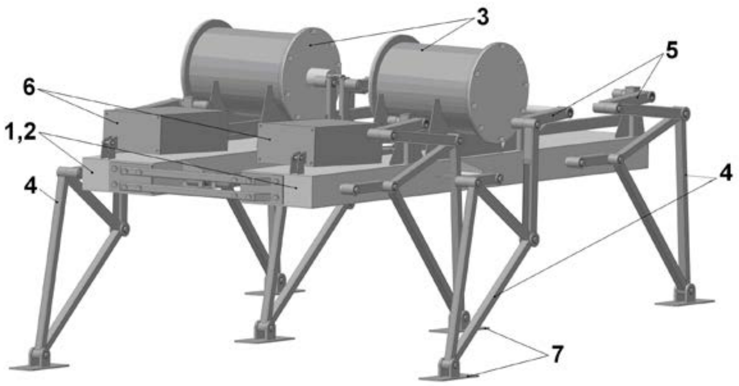


Fig. 1. Design scheme of the underwater walking device MAK-1:
1 — walking limbs (walking modules); 2 — bearing beam; 3 — on-board electrical drive in water resistant boxes; 4 — walking mechanisms; 5, 6 — suspension point mover mechanism and his linear electrical drive; 7 — foots

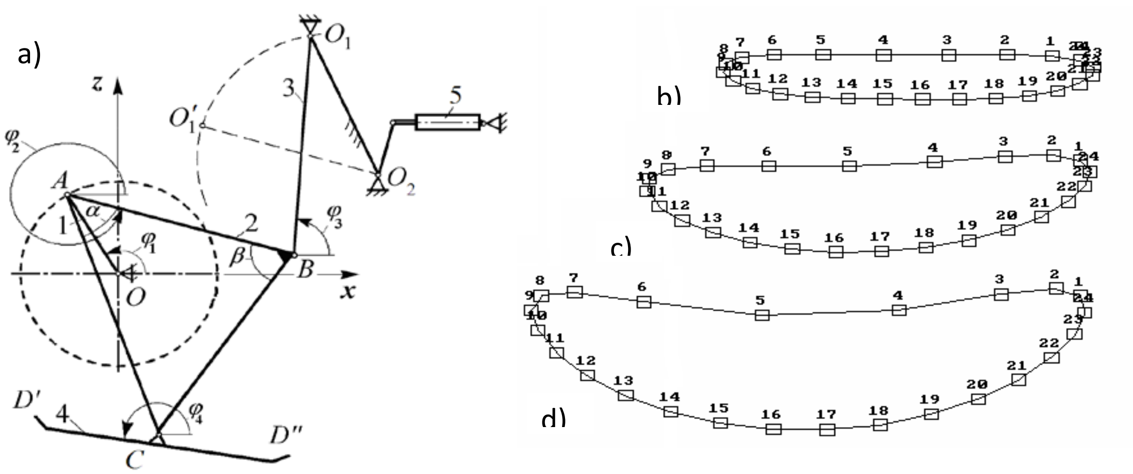


Fig. 2. Scheme of walking mechanism of the device MAK-1 (a) and transformation of its supporting point during movement of arm supporting point (b, c, d):
1 — main winch; 2 — supporting link; 3 — arm; 4 — foot; 5 — linear electrical drive; O_1O_2 — controlled turning link of movement supporting point

In MAK-1 walking device the ability to combine and adjust the programmed leg moves has been achieved by introduction in walking mechanism of additional controlled degree of freedom as additional link (additional winch) with linear electrical drive (Fig. 2). Control of turning link brings to changing of its angular position (as gear shift in traditional vehicles). It brings to shifting of arm point of support of the walking mechanism and to transformation of forward movement base trajectory (Fig. 2 b) into obstacles passage mode with increased height and length of step (Fig. 2 c, d). At the same time walking mechanism is have one degree of freedom. Thereby control of relative supporting points trajectory is achieved (in quite wide range).

Adaptation to supporting surface curves.

In forward movement mode, which different by biggest energy efficiency, height of the device step is comparably small (Fig. 2 b). For shape passableness increasing in forward movement mode in MAK-1 walking device the system of passive adaptation of the foot to supporting surface has been realized. The supporting point trajectory of walking mechanism had been synthesized, it provides rising of toe of the foot in transferal phase at the expense for its kinematics and friction in foot joint, both during straight and reverse (back action) movement [7, 8]. In a last case toe and heel exchanging their places. Fig. 3, 4 shows angles of foot tilt and its position characteristics, respectively, in forward and reverse movement mode.

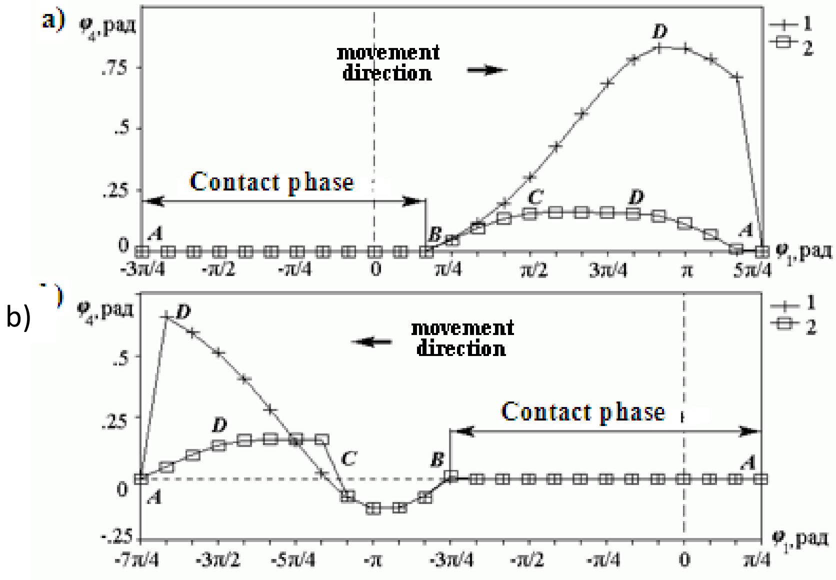


Fig. 3. Passive adaptation to supporting surface system: adjustment of foot angle φ_4 during the cycle in straight (a) and reverse (б) movement for rounded foots (curve 1) and ski-shaped foot (curve 2).

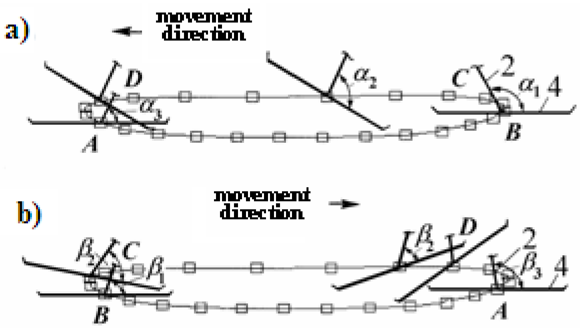


Fig. 4. Walking mechanism supporting point trajectory with specific foot positions during straight (a) and reverse (b) device movement: 2 — supporting link; 4 — foot (Fig. 2 a)

Self-adapting of the foot increases mover abilities on adaptability to ground curves and gives ability to pass an obstacles, which exceeds walking mechanism supporting point rising height by more than two times. If during passing of obstacle toe of the foot standing on its edge, on the next step an obstacle will be passed. In other case is necessary to pass on special maneuvering mode, with increased step height (Fig. 2 c, d) at the cost of shifting of walking mechanism arm suspension point.

Control of the underwater walking device movement

At present the methods of underwater walking device movement remote control are tested. Experience of walking machine control in rough terrain conditions, which executioners are have, shows, that operator not always can effectively to control all moves, and for visual control of each leg movement, for example, in process of obstacle passage, large video sensors quantity is necessary. Moreover, in our case it is impossible to have an operator right on the machine. That is why next way of movement control is assumed. Operator is not on the workspace and controls autonomously working machine on the visual information, transmitted from on-board video sensors and intervenes in movement control only if necessary. Task of movement control is solving without operator participating at low level of control (by on-board computer). At the same time there is no task of useful information determining by algorithms of picture processing in on-board video cameras signals to determine workspace characteristics, external conditions are assigned and shown on monitor display of operator as angle and angular speeds of jointly fixed foots, on positions of main winches and on amperage of on-board traction electrical drives and on some other parameters. In this case, the low level control system is not allows to find and truly determine the type and position of an obstacle — the control performs in partial and mixed information about a current situation. Therefore control failures are possible, when control given to high level (to the operator).

Underwater walking device tests

With the purpose to investigate design features influence of the walking mover on its roadhold properties and passableness in underwater conditions, testing the MAK-1 walking device at small deeps have been held (Fig. 4). Dynamics of its supporting elements interaction with bottom ground have been investigated [9].

Fig. 4. Underwater walking device MAK-1 tests

During the underwater tests was used the method, based on video recording of the walking device movement process with gradually increasing hook force with frame by frame processing of video on PC [10]. Frame by frame processing (Fig. 5) consist in determining of position relatively any natural landmark, which have been catch by frame, marks, which established on legs and body of walking device. It allowed to determine the motion rule of the legs and body in relative and vertical direction, and on its values speed of foot slipping. Results of the tests was used in determining of adhesion coefficient for walking machines under consideration.

a) b)

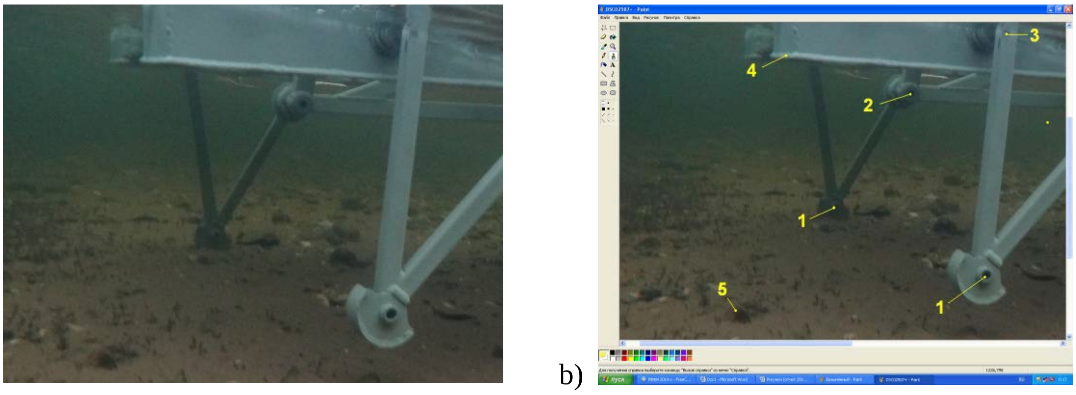


Fig. 5. Frame by frame processing on PC of movement process video of the underwater walking device: 1–4 — leg and body marks (on frame) of the walking device; 5 — natural landmark

The tests have been shown, that on relatively good grounds walking machines roadhold properties are exceed the same ones of wheel machines, it have small differences from track machines roadhold properties. Substantial advantage of the walking machines on traction properties could be catch only in very hard conditions, particularly, in underwater ground conditions. So on underwater grounds the walking machines adhesion coefficient was changed in dependence from ground properties, from 0,2 to the values, which could be compared with good properties ground (k_φ = 0,8–1,0), in some cases the k_φ values was more that 1. Best adhesion, as a rule, was during the substantial leg diving in the ground. With that substantial influence of the grouser on roadhold properties had not been observed.

Conclusion

Held underwater tests shown, that walking machines on roadhold properties and ground passableness significantly better that track and wheel machines. Thus, in underwater ground conditions with low-bearing capacity walking movers, in compare with track and wheel, can provide better roadhold properties and increased ground passableness. Shape passableness of the walking machines is also better. Therefore walking machines can be used in new industrial technologies of sea bottom resources exploration implementation.

1. Chernyshev V.V., Gavrilov A.E. Traction properties of walking machines on underwater soils with a low bearing ability // Minerals of the Ocean – 7 & Deep-Sea Minerals and Mining – 4: abstracts of Int. Conf. / VNIIOkeangeologia. - St. Petersburg, 2014. C. 21-24.
2. The Investigation of Walking Machines with Movers on the Basis of Cycle Mechanisms of Walking / Briskin E.S., Chernyshev V.V., Maloletov A.V., Zhoga V.V. // The 2009 IEEE Int. Conf. on Mechatronics and Automation / Changchun Univ. of Science and Technology. - [Piscataway, USA]. P. 3631-3636.
3. Чернышев В.В. Опыт использования шагающей машины для ликвидации аварийного разлива нефти // Безопасность жизнедеятельности. 2003. №5. С. 28-30.
4. Брискин Е.С., Чернышев В.В., Малолетов А.В., Шаронов Н.Г. Сравнительный анализ колёсных, гусеничных и шагающих машин // Робототехника и техническая кибернетика. 2013. № 1. С. 6-14.
5. On ground and profile practicability of multi-legged walking machines / Briskin E.S., Chernyshev V.V., Maloletov A.V and others //Climbing and Walking Robots. CLAWAR 2001: Proc. of the 4-th Int. Conf. Karlsruhe, Germany, 2001. P.1005–1012
6. Пат. 2207583 РФ, МПК 7 B 62 D 57/032 Шагающая опора для транспортных средств повышенной проходимости / В.В. Чернышев, Е.С. Брискин, А.Ю. Савин; ВолгГТУ. 2003.
7 Брискин Е.С., Чернышев В.В. Цикловые механизмы шагания с пассивно управляемой стопой // Теория механизмов и машин. 2004. №1. С. 80-88.
8. Пат. 2156711 РФ, B 62 D 57/032. Шагающая опора для транспортных средств повышенной проходимости / Охоцимский Д.Е., Брискин Е.С., Чернышев В.В., Шерстобитов С.В.; ВолгГТУ. 2000.
9. Исследования динамики взаимодействия движителя подводного шагающего аппарата с донным грунтом / Чернышев В.В., Арыканцев В.В., Гаврилов А.Е., Калинин Я.В. // Исследования наукограда. 2015. № 1 (11). С. 32-36.
10. Брискин Е.С., Чернышев В.В., Фролова Н.Е. О позиционной зависимости тягово-сцепных свойств шагающих машин с цикловыми движителями // Тракторы и сельхозмашины. 2009. № 6. С. 21-25.

В.В. Чернышев, В.В. Арыканцев

ПОДВОДНЫЙ ШАГАЮЩИЙ АППАРАТ МАК-1*

Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград

dtm@vstu.ru

Введение

Изучение и промышленное освоение ресурсов морского дна невозможно без специальных технических средств. Важная роль среди машин для освоения морского дна отводится донным агрегатам, снабжёнными добычными и геологоразведочными рабочими органами в виде рыхлителей, ковшей, подборщиков, отвалов, грунтовых насосов и т. п. Практика подводно-технических работ также ставит целый ряд задач, связанных с проведением грунтовых работ (выравнивание площадок на дне, отмыв траншей для закладки в них трубопроводов и кабелей, закрытие их грунтом и др.). Эти работы трудоемки, требуют значительной мощности используемых машин и создаваемых ими при работе тяговых усилий на рабочий инструмент. В качестве средств передвижения по дну уже используются машины с движителями гусеничного и колесного типа [1]. Однако условия эксплуатации, характеризующиеся низкой несущей способностью грунтов и пересечённостью поверхности дна, делают малопригодными традиционные типы движителей. Более подходящими для использования в условиях морского дна представляются шагающие движители, обладающие более высокую грунтовую и профильную проходимость. У шагающих машин также имеет место снижение затрат тягового усилия на сопротивление движению — для них, в отличие от колесных и гусеничных, грунт не является препятствием для передвижения, а лишь требует необходимых затрат мощности на его прессование [1].

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 13-08-01144-а, 15-08-10166-к, 15-41-02451 р_поволжье_а.

В Волгоградском государственном техническом университете на факультете транспортных комплексов и систем вооружения разработан ряд опытных образцов шагающих машин [2, 3]. Большинство из них были испытаны в условиях реальной местности. Более того, имеется практический опыт использования шагающих машин на подводных грунтах. Шагающий робот «Восьминог» участвовал в экспериментах по ликвидации аварийного разлива нефти в заболоченном водоеме и в ремонтно-технологических работах в пруду-накопителе очистных сооружений Волжского азотно-кислородного завода, заполненном илообразным осадком [3].

Вместе с тем, конструкция шагающего движителя циклового типа робота «Восьминог», не предусматривающая варьирование параметров шага, существенно ограничивала возможности по исследованию влияния конструктивных особенностей движителя на энергоэффективность движения и проходимость на подводных грунтах. Кроме того большой вес робота (около 5 т) ограничивал его мобильность при проведении экспериментов в экстремальных условиях (в плане доставки к месту экспериментов). Поэтому, в ВолгГТУ совместно с ОАО «ЦКБ Титан», был разработан модульный аппаратный комплекс, предназначенный для оптимизации параметров механизмов шагания и отработки энергоэффективных походок прототипов мобильных робототехнических систем с шагающим движителем. На его базе был разработан подводный шестиногий шагающий аппарат МАК-1, предназначенный для работы на небольших глубинах. В работе обсуждаются конструктивные особенности шагающего аппарата и некоторые результаты его подводных испытаний.

Конструктивные особенности шагающего аппарата МАК-1

Конструктивно аппарат включает в себя жестко соединенные между собой шагающие опоры (шагающие модули) правого и левого борта (рис. 1). Рама, соединяющая шагающие опоры между собой, сменная. Ее конструкция может меняться в зависимости от требуемого навесного оборудования. Шагающие опоры выполнены в виде несущих балок, снабженных бортовым силовым электроприводом, на которых закреплены шагающие движители. Бортовые электроприводы выполнены в виде отдельных силовых блоков (силовых модулей), расположенных в водозащищенных боксах. Питание привода осуществляется по кабелю от внешнего автономного источника электропитания (бензогенератора) или от бытовой электросети. Суммарная мощность бортовых приводов — около 2 кВт. Предусмотрена возможность плавного изменения скорости передвижения. Масса аппарата около 150 кг. Максимальная скорость на суше до 3–5 км/ч, под водой — около 1 км/ч. Аппарат может работать на глубинах до 20 м. Модульная технология, использованная в конструкции аппарата МАК-1, позволяет его легко модернизировать под конкретную задачу.

Шагающие движители аппарата — циклового типа, с возможностью корректировки траектории опорных точек. Механизмы шагания — цикловые, на базе 4-х звенных плоских механизмов (использовались механизмы шагания Умнова-Чебышева) с шарнирно прикрепленными стопами (рис. 2). Стопы сменные (лыжеобразные и малые, скругленные). Возможно движение без сменных стоп (конструкция опорных точек механизмов шагания адаптирована к взаимодействию с грунтом).

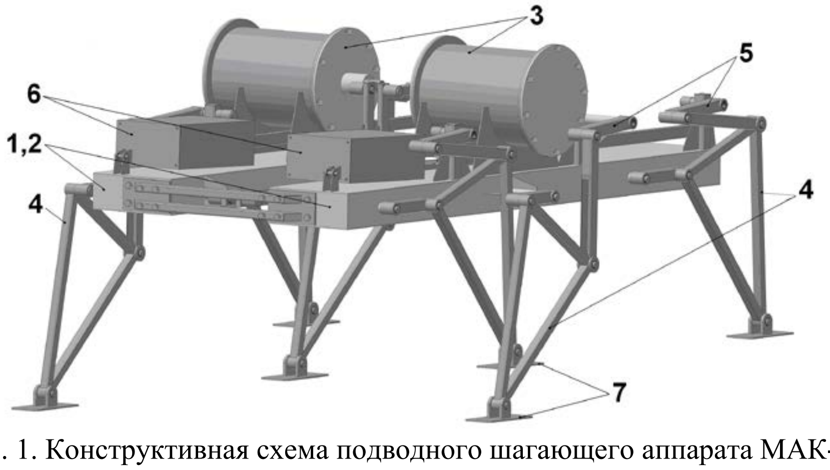


Рис. 1. Конструктивная схема подводного шагающего аппарата МАК-1:
1 — шагающие опоры (шагающие модули); 2 — несущие балки; 3 — бортовой электропривод в водозащищенных боксах; 4 — механизмы шагания; 5, 6 — механизм смещения точек подвеса механизмов шагания и его линейный электропривод, соответственно; 7 —стопы

Движитель состоит из 3-х механизмов шагания (Рис. 2), циклового типа, кинематически жёстко связанных и работающих в противофазе (2 механизма шагания работают синфазно, а средний в противофазе). В результате в каждый момент времени хотя бы один из механизмов шагания находится в контакте с грунтом, таким образом, коэффициент режима такого движителя равен 1. Использование цикловых движителей позволяет не заботиться о сохранении походки и устойчивости и исключает необходимость управляемой системы адаптации. В результате машины имеют минимальное число управляемых степеней свободы и становятся существенно проще и дешевле аналогов с адаптивным управлением. Испытания экспериментальных образцов шагающих машин с цикловыми движителями показывают, что они отличаются простотой и надежностью и могут эффективно работать в экстремальных ситуациях [3–5]. Вместе с тем моделирование динамики типовых случаев движения цикловых шагающих машин показывает, что для полной реализации их возможностей по профильной проходимости и маневренности необходима возможность комбинирования и корректировки программных движений ног. Например, изменение длины шага перед препятствием для обеспечения наиболее выгодного положения стопы, увеличение высоты шага при прохождении выступающего препятствия, комбинирование ног при повороте для снижения момента сопротивления повороту и др.

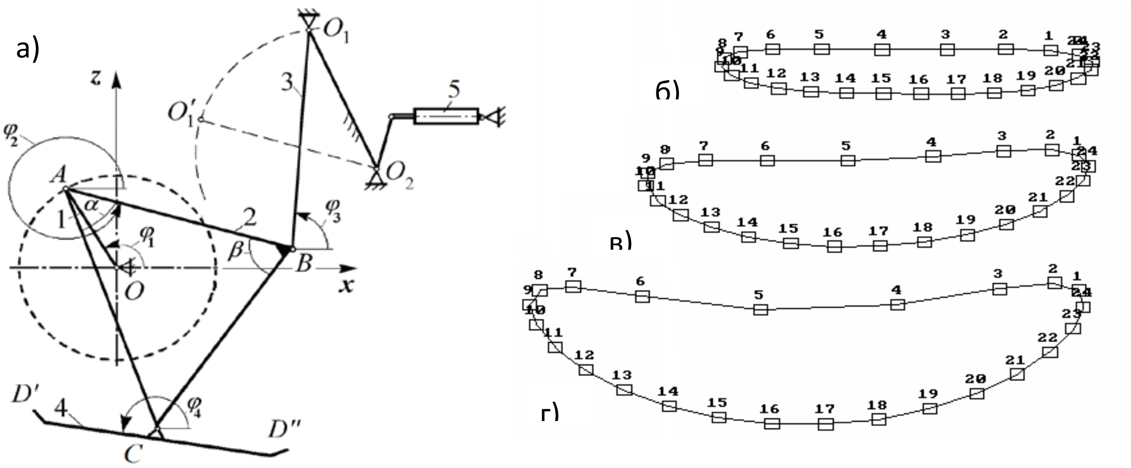


Рис. 2. Схема механизма шагания аппарата МАК-1 (а) и трансформация траектории его опорной точки при смещении точки подвеса коромысла (б, в, г):
1 — ведущий кривошип; 2 — опорное звено; 3 — коромысло; 4 — стопа; 5 — линейный электропривод; O_1O_2 — управляемое поворотное звено смещения точек подвеса

В шагающем аппарате МАК-1 возможность комбинирования и корректировки программных движений ног была достигнута введением в механизм шагания дополнительной управляемой степени свободы [6] в виде дополнительного поворотного звена (дополнительного кривошипа) с линейным электроприводом (Рис. 2). Управление поворотным звеном сводится к изменению его углового положения (аналогично переключению передач в традиционных транспортных средствах). Это приводит к смещению точки подвеса коромысла механизма шагания и трансформированию базовой траектории маршевого движения (Рис. 2 б) в траекторию режима преодоления препятствий с увеличенной высотой и длиной шага (Рис. 2 в, г). Механизм шагания при этом остается одностепенным. Тем самым достигается управление (в довольно широких пределах) относительной траекторией опорных точек.

Адаптация к неровностям опорной поверхности

В маршевом режиме движения, отличающимся наибольшей энергоэффективностью, высота шага аппарата сравнительно небольшая (Рис. 2 б). Для повышения профильной проходимости в маршевом режиме движения в шагающем аппарате МАК-1 реализована система пассивной адаптации стопы к опорной поверхности в маршевом режиме движения. Была синтезирована траектория опорной точки механизма шагания, обеспечивающая, за счет его кинематики и трения в шарнире стопы, подъем носка стопы в фазе переноса, как при прямом, так и при реверсивном (задним ходом) движении [7, 8]. В последнем случае носок и пятка стопы меняются местами. На Рис. 3, 4 показаны углы наклона стопы и ее характерные положения, соответственно, при прямом и реверсивном движении.

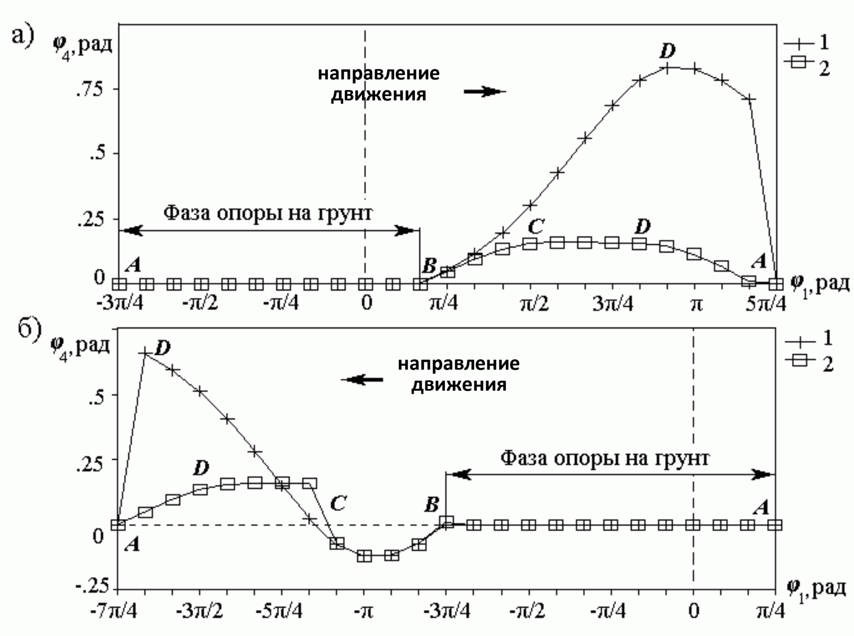


Рис. 3. Пассивная адаптация стопы к опорной поверхности: изменение угла наклона стопы за цикл при прямом (а) и реверсивном (б) движении для скругленной (кривые 1) и лыжеобразной (кривые 2) стопы

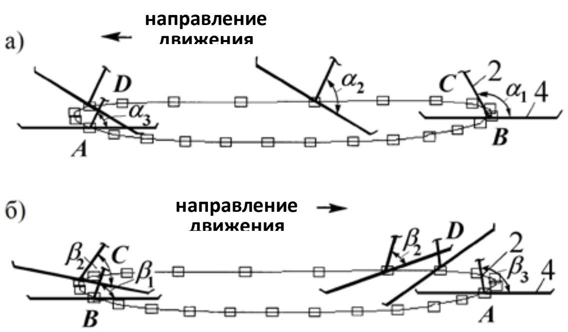


Рис. 4. Траектория опорной точки механизма шагания с характерными положениями стопы при прямом (б) и реверсивном (в) движении аппарата: 2 — опорное звено; 4 — стопа (Рис. 2 а)

Самоадаптация стопы повышает возможности движителя по приспособляемости к неровностям грунта и дает возможность преодолевать препятствия, более чем вдвое превышающие высоту подъема опорной точки механизма шагания. Если при преодолении выступающего препятствия носок стопы установился на его краю, то на следующем шаге препятствие будет преодолено. В противном случае необходимо перейти в режим специального маневрирования, увеличив высоту шага (рис. 2 в, г) за счет смещения точки подвеса коромысла механизма шагания.

Управление движением подводного шагающего аппарата

В настоящее время отрабатываются методы дистанционного управления движением подводного шагающего аппарата. Имеющийся у исполнителей проекта опыт управления шагающей машиной в условиях сложного рельефа местности показывает, что оператор не всегда может эффективно управлять всеми движителями одновременно, а для визуального контроля движения каждой ноги, например, в процессе преодоления препятствия, необходимо большое количество бортовых видеосенсоров. Кроме того, присутствие оператора в нашем случае непосредственно на машине невозможно. Поэтому предполагается следующий подход при управлении движением. Оператор находится вне рабочего пространства и контролирует работу автономно работающей машины по визуальной информации поступающей с бортовых видеосенсоров и вмешивается в управление движением лишь при необходимости. Задача управления движением решается без участия оператора на низшем уровне управления (бортовым компьютером). При этом не ставится задача выделения алгоритмами обработки изображений полезной информации в сигналах бортовых видеокамер с целью определения характеристик рабочего пространства, а внешние условия задаются и отображаются на экране монитора оператора как функции углов и угловых скоростей шарнирно закрепленных стоп, по положению ведущих кривошипов и по току бортовых тяговых электродвигателей и по некоторым другим параметрам. Система управления на низшем уровне, в этом случае, не позволяет обнаруживать и достоверно определять тип и расположение препятствия — управление осуществляется в условиях неполного и неоднозначного представления о текущей ситуации. Поэтому возможны сбои в управлении, при которых управление передается на верхний уровень (оператору машины).

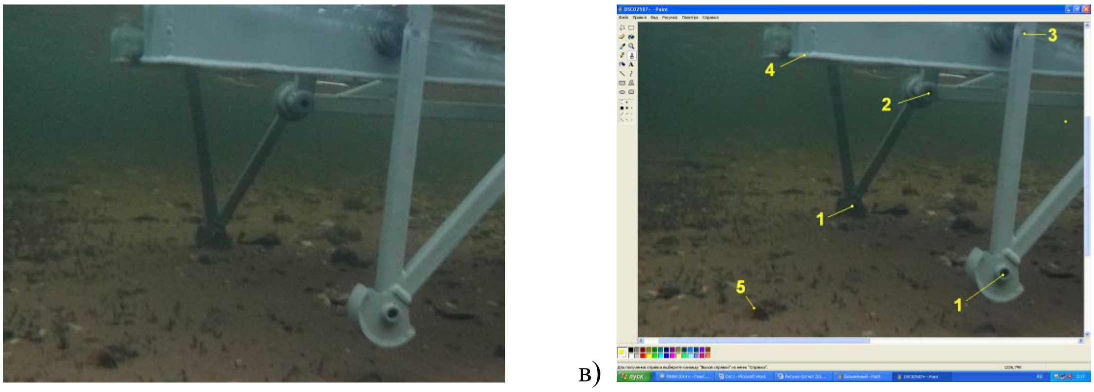
Подводные испытания шагающего аппарата

С целью исследования влияния конструктивных особенностей шагающего движителя на его тягово-сцепные свойства и проходимость в подводных условиях, были проведены испытания шагающего аппарата МАК-1 на небольших глубинах (рис. 4). Исследовалась динамика взаимодействия его опорных элементов с донным грунтом [9].

Рис. 4. Испытания подводного шагающего аппарата МАК-1

При проведении подводных экспериментов использовался метод, основанный на видеосъемке процесса движения шагающего аппарата при постепенно увеличивающейся крюковой нагрузке с последующей покадровой обработкой видеозаписи на ЭВМ [10]. Покадровая обработка видеозаписи (рис. 5) заключалась в определении положения относительно любого естественного ориентира, попавшего в кадр, меток расположенных на ногах и корпусе шагающего аппарата. Это позволяло определить законы движения ног и корпуса в курсовом и вертикальном направлении, а по их значениям скорость буксования стоп. Результаты экспериментов были использованы при определении коэффициентов сцепления для шагающих машин рассматриваемого типа.

а)



в)

Рис. 5. Покадровая обработка на ЭВМ видеозаписи процесса движения шагающего аппарата: 1–4 — метки ног и корпуса (рамы); 5 — естественный ориентир

Испытания показали, что на относительно хороших грунтах тягово-сцепные свойства шагающих машин хотя и превосходят тягово-сцепные свойства колесных машин, но мало отличаются от аналогичных свойств гусеничного движителя. Существенное превосходство шагающих машин по тяговым свойствам и проходимости проявлялось лишь при движении в особо сложных условиях, в частности, в условиях подводного грунта. Так на подводных грунтах коэффициент сцепления у шагающих машин изменялся, в зависимости от свойств грунта, от 0,2 до значений соизмеримых с грунтами с хорошими сцепными свойствами (k_φ = 0,8–1,0), а в ряде случаев значения k_φ были больше 1. Наилучшее сцепление, как правило, имело место при значительном погружении ноги в грунт. При этом существенного влияния грунтозацепов на тягово-сцепные свойства замечено не было.

Заключение

Проведенные подводные испытания показали, что шагающие машины по тягово-сцепным свойствам и грунтовой проходимости существенно превосходят колесные и гусеничные машины. Таким образом, в условиях подводного слабонесущего грунта шагающие движители, в сравнении с гусеничными и колесными, могут обеспечить более высокие тягово-сцепные свойства и повышенную грунтовую проходимость. Профильная проходимость шагающих машин так же существенно выше. Поэтому шагающие машины могут быть востребованы при внедрении новых промышленных технологий освоения ресурсов морского дна.

1. Chernyshev V.V., Gavrilov A.E. Traction properties of walking machines on underwater soils with a low bearing ability // Minerals of the Ocean – 7 & Deep-Sea Minerals and Mining – 4: abstracts of Int. Conf. / VNIIOkeangeologia. - St. Petersburg, 2014. С. 21-24.
2. The Investigation of Walking Machines with Movers on the Basis of Cycle Mechanisms of Walking / Briskin E.S., Chernyshev V.V., Maloletov A.V., Zhoga V.V. // The 2009 IEEE Int. Conf. on Mechatronics and Automation / Changchun Univ. of Science and Technology. - [Piscataway, USA]. P. 3631-3636.
3. Чернышев В.В. Опыт использования шагающей машины для ликвидации аварийного разлива нефти // Безопасность жизнедеятельности. 2003. №5. С. 28-30.
4. Брискин Е.С., Чернышев В.В., Малолетов А.В., Шаронов Н.Г. Сравнительный анализ колёсных, гусеничных и шагающих машин // Робототехника и техническая кибернетика. 2013. № 1. С. 6-14.
5. On ground and profile practicability of multi-legged walking machines / Briskin E.S., Chernyshev V.V., Maloletov A.V and others //Climbing and Walking Robots. CLAWAR 2001: Proc. of the 4-th Int. Conf. Karlsruhe, Germany, 2001. P.1005–1012
6. Пат. 2207583 РФ, МПК 7 B 62 D 57/032 Шагающая опора для транспортных средств повышенной проходимости / В.В. Чернышев, Е.С. Брискин, А.Ю. Савин; ВолгГТУ. 2003.
7 Брискин Е.С., Чернышев В.В. Цикловые механизмы шагания с пассивно управляемой стопой // Теория механизмов и машин. 2004. №1. С. 80-88.
8. Пат. 2156711 РФ, B 62 D 57/032. Шагающая опора для транспортных средств повышенной проходимости / Охоцимский Д.Е., Брискин Е.С., Чернышев В.В., Шерстобитов С.В.; ВолгГТУ. 2000.
9. Исследования динамики взаимодействия движителя подводного шагающего аппарата с донным грунтом / Чернышев В.В., Арыканцев В.В., Гаврилов А.Е., Калинин Я.В. // Исследования наукограда. 2015. № 1 (11). С. 32-36.
10. Брискин Е.С., Чернышев В.В., Фролова Н.Е. О позиционной зависимости тягово-сцепных свойств шагающих машин с цикловыми движителями // Тракторы и сельхозмашины. 2009. № 6. С. 21-25.

А.Ю. Алейников, А.Н. Афонин, А.Р. Гладышев, А.Д. Новосельцев

РЕАЛИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ АВТОНОМНОГО МОБИЛЬНОГО ЗМЕЕПОДОБНОГО РОБОТА

ФГАОУ ВПО НИУ «БелГУ», г. Белгород
afonin@bsu.edu.ru

Змееподобные роботы являются одним из наиболее перспективных видов мобильных роботов. Особенностью данных роботов является перемещение в пространстве за счет волновых изгибов корпуса, подражающего движениям змей. Достоинством змееподобных роботов является возможность свободно перемещаться по пересеченной местости, проникать в труднодоступные места (узкие отверстия, трубопроводы и т.д.), двигаться как по твердым поверхностям, так и в жидкой среде. Разработке конструкций змееподобных роботов посвящены такие работы, как [2-6]. Однако, несмотря на существенную работу, проделанную по проектированию змееподобных роботов, они пока не нашли широкого применения. Причиной этого является то, что существующие конструкции змееподобных роботов являются экспериментальными и плохо пригодны для практического использования. Таким образом, создание новых рациональных конструкций автономных мобильных змееподобных роботов является актуальной задачей.

Предлагаемый робот [1] создан на основе механической конструкции, имеющей 11 одинаковых звеньев с двумя перпендикулярно закрепленными сервоприводами (серводвигателями с редуктором) в каждом, голову и хвост (рис. 1). Радиальное перемещение звеньев друг относительно друга осуществляется посредством пары сервоприводов, расположенных перпендикулярно относительно друг друга в каждом звене. Такая конструкция содержит 24-степени свободы. Момент вращения каждого сервопривода составляет не менее 0,8 Н·м.

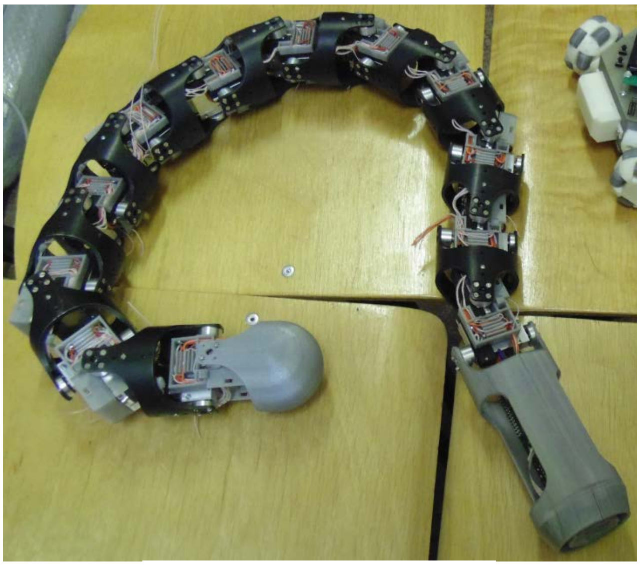


Рис. 1. Змееподобный робот

Корпуса звеньев изготовлены из алюминиевого сплава. Другие механические детали, включая хвост и голову, получены с помощью 3D печати на FDM принтере.

Распределенная система управления робота включает 4 низкоуровневые ведомые микроконтроллерные платы управления сервоприводами, соединенные с управляющей платой посредством интерфейса RS485, и одну высокоуровневую плату Raspberry PI с предустановленной операционной системой Raspbian, используемую на данном этапе только для трансляции потокового видео от установленной в голове робота камеры по сети WiFi. Питание робота осуществляется от набора встроенных LiPo аккумуляторных батарей. Структурная схема распределенной системы управления робота приведена на Рис. 2.

Система управления роботом представлена набором ведомых плат (блок 4.1-4.4) на основе микроконтроллеров Atmega16, каждая из которых имеет шесть независимых каналов - источников ШИМ сигналов частотой 50 Гц в диапазоне длительностей импульсов от 0,9 до 2,1 мс, предназначенных для задания углов поворота сервоприводов (блоки 5.1-5.4) и ведущей платы на основе микроконтроллера Atmega64 со сдвоенным UART интерфейсом. Связь между платами осуществляется по интерфейсу RS485 на скорости 115200 кбод.

Для ориентации робота использован набор датчиков 10 DOF. В нем интегрированы 3-х осевой акселерометр ADXL345, магнитометр HMC5883L, гироскоп ITG-3205 и барометрический датчик давления BMP085. Соединение осуществляется по интерфейсу I2C.

Робот имеет автономное питание от набора LiPo аккумуляторных батарей. Предусмотрено раздельное питание силовой части (сервоприводы) и системы управления. Преобразование напряжения до приемлемого значения в 5 В осуществляется посредством step-up преобразователей напряжения MAX1709.

Распределение аккумуляторных батарей вдоль тела робота обеспечивает равномерный разряд при неравномерной нагрузке сервоприводов. Соединение выходов силовых преобразователей, распределенных вдоль тела робота с учетом запитки сервоприводов в различных точках тела позволяет избежать перегрузок отдельных преобразователей. В дополнение указанная схема позволяет снизить требования к сечению силовых проводов и как следствие уменьшить нагрузку на сервоприводы, связанную с изгибом.

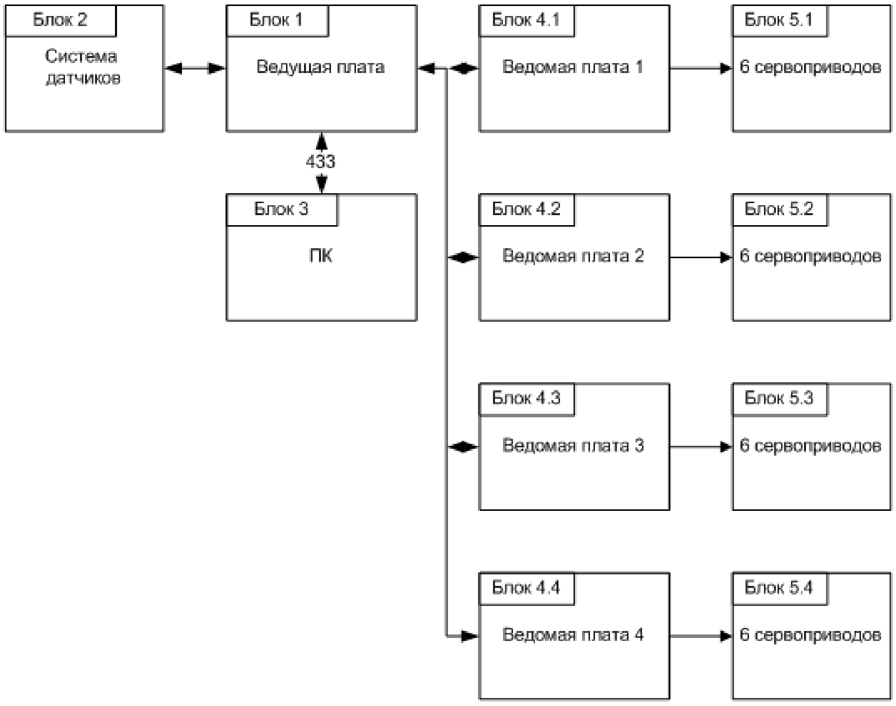


Рис. 2. Структурная схема распределенной системы управления

В процессе передвижения робота неравномерная нагрузка на звенья может приводить к выходу из строя механических и электронных элементов сервопривода в связи со спецификой его работы. Учет реального угла поворота и соотношение его с желаемым позволяет предупредить данную ситуацию.

Для реализации змееподобного движения была реализована модель бегущей волны с настраиваемыми параметрами. Для обеспечения передвижения робота, програмно в ведущем звене была реализована зависимость, определяющая змеиный изгиб [5]:

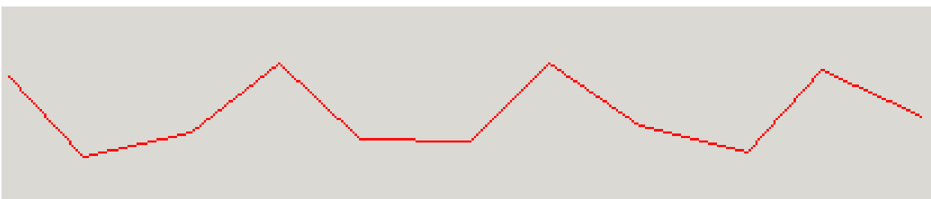
$$\phi_i(t) = 2\alpha \sin\big(\omega_s t + (i-1)\beta\big) + \gamma$$
$$\alpha = a\left|\sin\left(\frac{\beta}{2}\right)\right|, \quad \beta = \frac{b}{n}, \quad \gamma = -\frac{c}{n} \qquad (1)$$

где $\varphi_i(t)$ – угол поворота i-го звена, ω_s-угловая скорость, α,β γ – параметры формы змеиного изгиба, α-степень волнистости, b- количество периодов в единице длины, c – коэффициент смещения.

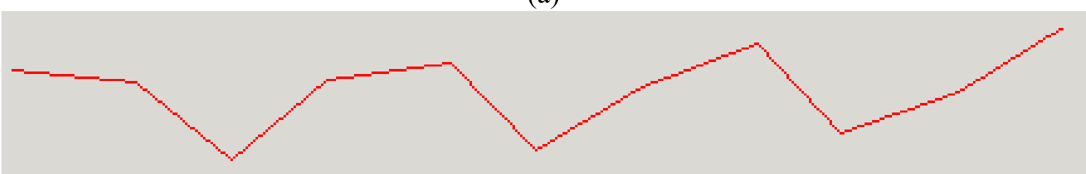
Указанные значения углов поворота i-х звеньев непрерывно (по вертикальной плоскости) по протоколу Modbus передавались на соответствующие ведомые звенья.

С целью обеспечения устойчивости робота во время передвижения, по горизонтальной плоскости был реализован статический синус-подобный изгиб.

Для управления движением робота разработано специальное программное обеспечения. На рисунке 3 приведена компьютерная симуляция движения звеньев робота при количестве периодов в длине, равном удвоенному количеству звеньев в различные моменты времени.



(а)



(б)

Рис. 3. Компьютерная симуляция движения звеньев робота

Создаваемая бегущая волна, реализуемая в вертикальной плоскости, делает возможным передвижение робота в направлении движения волны.

С увеличением количества периодов, движение усложняется, и становится больше напоминающим колебания пружины.

При увеличении амплитудной составляющей изгиба робота (параметр а в формуле (1)), заметно увеличивается нагрузка на сервоприводы энергопотребление системы.

Программирование робота осуществляется посредством интерфейса ICSP.

Проведенные исследования позволили создать работоспособную конструкцию змеевидного робота, который может быть использован при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций и проведении поисково-спасательных работ; геологических изысканий, в сельском хозяйстве и т. д.

Одним из наиболее перспективных направлений применения змееподобных мобильных роботов является диагностика трубопроводов. Предполагается создание совместно с ООО Газпром-Трансгаз змееподобного робота для неразрушающего контроля газопроводов.

Работа была выполнена при поддержке ИЦ “Бирюч” (Белгородская область, г. Алексеевка) в рамках государственного задания (проект 723).

1. Алейников А.Ю., Афонин А.Н. Мобильное робототехническое устройство с волнообразным способом передвижения // Матер. 4-й Междунар. научно-практ. конф. «Современные материалы, техника и технология». – Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, 2014. - С. 23-26
2. Будько И.А., Волков А.Н., Челпанов И.Б. Задачи механики змееподобных роботов //Научно-технические ведомости СПбГПУ, серия «Наука и образование» №3(130), 2011г. - С. 91-97;
3. Иванов А.А., Шмаков О.А., Демидов Д.А. Экспериментальное исследование змеевидного робота «Змеелок – 3» // Научно-технические ведомости СПбГТУ, 2013, Вып. 1. – С. 132-138;
4. Conkur E. Path planning algorithm for snake-like robots // Journal of information technology and control, 2008, Vol. 37, No.2;
5. Hirose S. «Biologically Inspired Robots (Snake-like Locomotor and Manipulator)», Oxford University Press, 1987;
6. Hopkins J.K., Spranklin B.W., Gupta S.K. A survey of snake-inspired robot designs // Bionispiration and Biomimetics, 4(2):021001, 2009.

R. Bogacheva, D. Konyshev

INTEGRATION OF CHATBOT TECHNOLOGIES INTO SPACE SERVICE ROBOT ANDRONAUT

Neurobotics, Zelenograd, Moscow, Russia
r.bogacheva@neurobotics.ru, d.konyshev@neurobotics.ru

The term "chat-bot" in the general sense refers to a computer program, the source that simulates spoken language with one or more people.

The objectives of the virtual interlocutor can be different:

– primitive "shoutboxes", written by students for training and entertainment;
– commercial products are usually chat bots integrated in the websites of the companies. Their task is to help the customer to make a purchase, to get answers to questions, to collect a database of visitors or to find out people’s interests;
– research projects aimed at search of algorithms that might make the system more intelligent (capable to keep the context of the dialogue as long as possible).

In 1950’s Alan Turing offered a test that could be used as a criteria for determination of the machine’s intelligence. The key point of the test is that at the end of it the person should determine whether his interlocutor was a real human or a machine.

Many chatbots (psychotherapist Eliza, Parry, ALICE, pBot, ChatMaster, Electronic Brain, Dearie (Dushka), Robot Mariska, info, etc.) have been developed since that time, but their aim -- simulation of real dialogue in the right context -- has not changed. The developers of the only chatbot that managed to pass the Turing test have gone further and come up with the identity of the bot – Eugene Gustman, 13-year-old boy from Odessa. Thus the program was able not to just keep the context but also to set it up. The core point was that the “teen” did not have answers to difficult questions just like a real teen. As a result, more than 30% of experts did believe in that trick.

In the second half of the 2014 TSIIMASH and Neurobotics have started a brand-new project dedicated to development of a robot aimed on the internal ship activities called Andronaut. The robot must provide the

crew with informational and psychological support as well as assistance in technical maintenance of the space station. Thus, the robot should become a full-fledged companion inspiring confidence.
To do high-quality non-verbal communication with the astronauts the robot requires anthropomorphic qualities and ability to recognize various non-verbal information such as facial expressions, gestures and posture. That is why Andronaut has human-like face and is able to express different emotions by means of LEDs around its eyes. High-quality verbal communication provided by means of chat bot technology.
The robot is equipped with a number of sensors and I/O devices that provide him with information about surrounding space and human interaction.

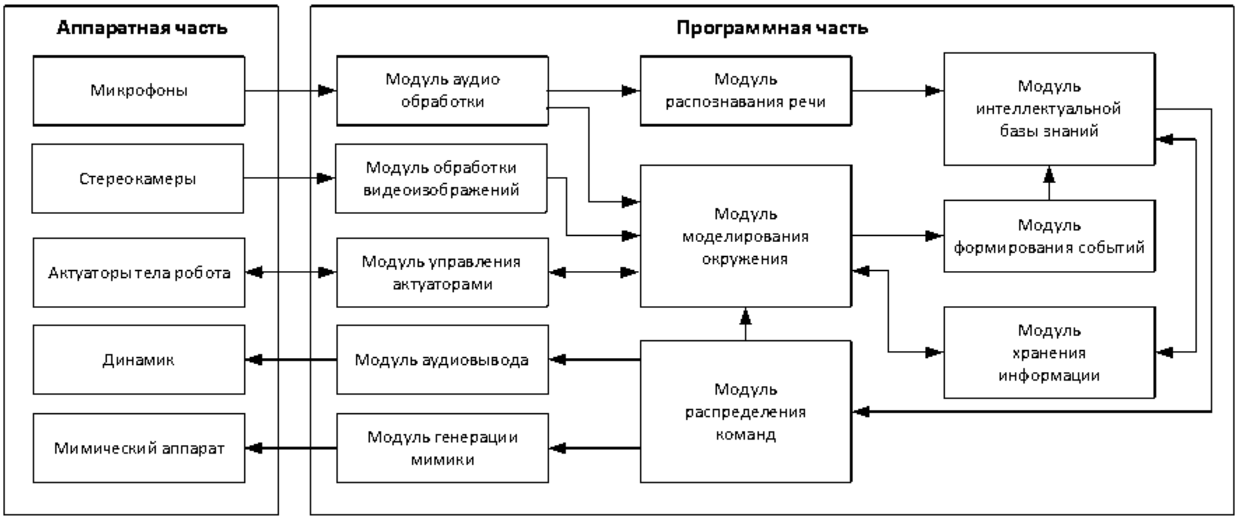


Fig. 1. Block diagram of intelligent input-output and processing systems

1. Array of microphones allows to perceive the speech of the interlocutor and to localize the sound source;
2. Stereo cameras for three-dimensional vision
3. Body actuators such as neck, arms, torso allow the use of non-verbal interface ("body language"): nodding, hand gestures, etc;
4. Speaker allows robot to speak with generated voice or play different media such as music or alarms.
5. Facial mimics based on a number of LEDs around eyes and eyebrows allow the robot to show simulated emotional states (joy, sadness, surprise, attention, etc.), show system status.
6. Portable tablet PC on the chest is used for representation of advanced facial mimic expressions and provides some control features.

To provide informational and psychological support service robot should have a basic set of functions. The primary ones are:
1. Speech recognition (translation of audio signal into the text for further processing);
2. Face recognition;
3. Speech generation;

These basic functions are included in a large number of applications and libraries. The result of its operation is regulated by international software standards.

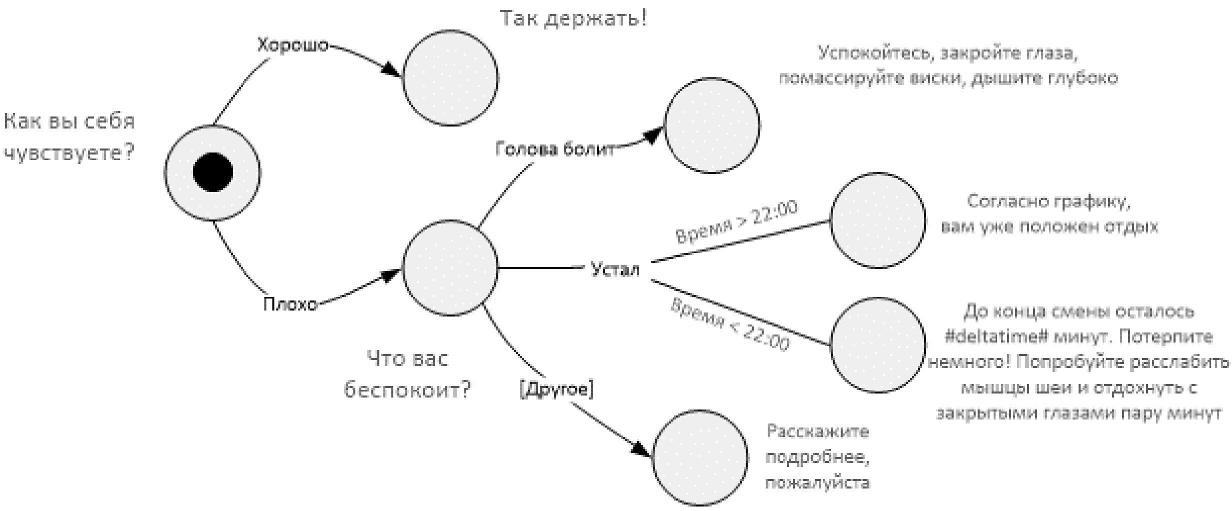


Fig. 2. Example of a simple dialogue with the chat bot

Intellectual knowledge base (IKB) unit is one of the most important parts of the system. Input of this unit receives signals speech recognition and environmental modelling units.

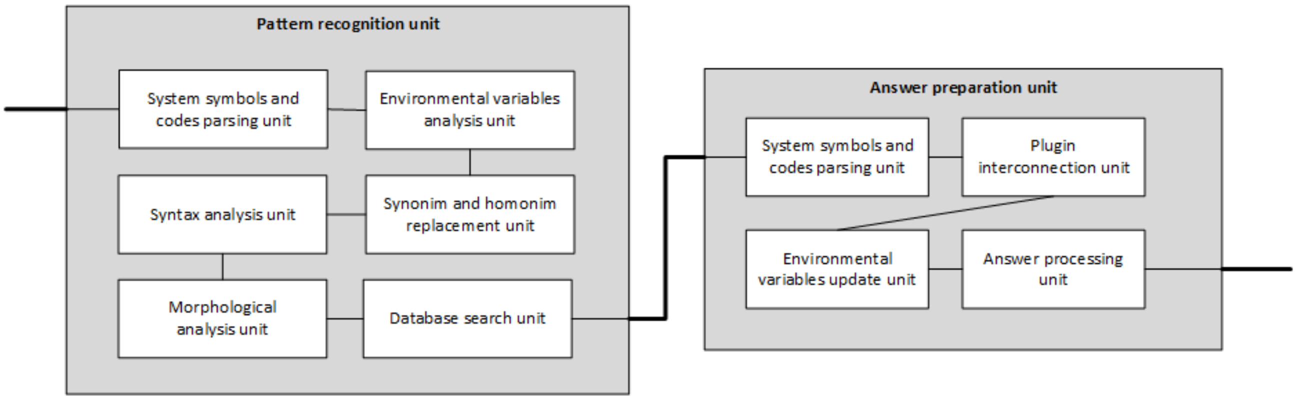


Fig. 3. Block diagram of the IKB unit

The basic structure consists of two modules:
1. Text pattern recognition unit
2. Answer generation unit
Output of the Intellectual knowledge base contains a set of special instructions such as
- variations of inner states;
- speech generation;
- the SR body position change request;
- SR mimic state change request;
- management of SR systems.

In general, the structure of the IKB represents a set of complex behavioral instructions (CBI). Each CBI is a connected set of elements, each of which can contain commands and transitions to other elements. All commands and inputs are written as text. Each command has its own priority.

Structure of IKB is similar to the structure of non-deterministic finite automata. However, there are significant differences in comparison to the classical finite automata:
- current CBI might be replaced by another one in case when another CBI has more priority.
- IKB can contain several current CBI states.

In common, CBI contain instruction in special scripting language and can control subsystems. The simplest CBI has one state, that represents a generated speech answer – just like a chat bot.

Input query is parsed using several special syntax rules:
- * (star) – replaces any text.
  Example: «* how do you do *». This query fires in cases: «Tell me, robot, how do you do?», «How do you do, robot»
- *=A – transit any text into temporary variable
- [A|B|C..] – allows to pick one of phrases as valid ones
- *varname – replaces this text with value of a variable of IKB

The answer is also parsed with several syntax rules. They include:
- Randomization of output from an array
  Example: «[Hello|Nice to meet you|Hi]» - picks one of those phrases
- Usage of plugins
  Example: «wiki({A})» - a Wikipedia integration plugin tries to get the definition of a word from variable {A}
- Usage of logical and other conditions
  Example: if (location == "Moscow") …

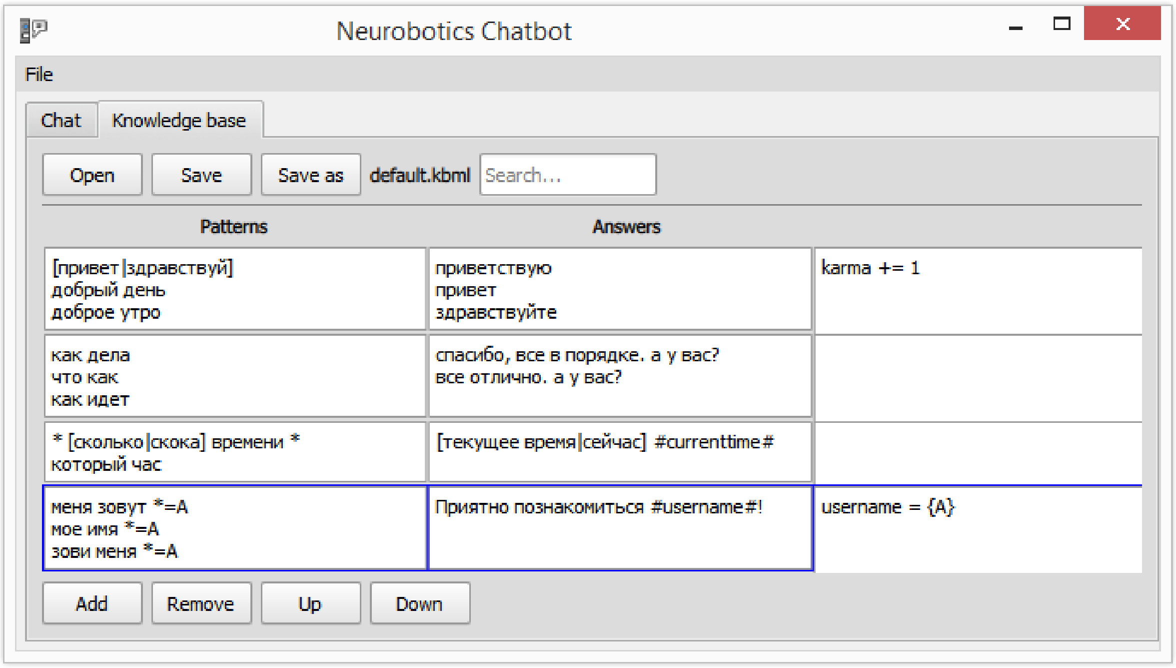


Fig. 4. User interface of database

Methods described above were developed to provide the system with capability to work in two modes simultaneously:

– Natural language – queries do not require strict grammar rules
– Command language - queries with special grammar rules to provide higher stability (e.g. «Open document about the main frame of onboard computer»)

The system uses modular approach in all of its elements. This allow to quickly and fluently change, disable and update subsystems. The system represents a special ecosystem for various text-processing operations, unified subsystem interaction.

Experiments were held in 2015 on Skolkovo Startup Village and "Balrobotov" exhibitions. The experiments showed that the system is able to display stable workflow, while being simple to be updated, and allowed visitors to chat seamlessly with the robot (especially the kids).During the experiments special syntax rules were implemented to smooth out the speech recognition errors.

1. ALICEBOT[electronic resource]: http://www.alicebot.org/, (The date of circulation: 11.10.2015)
2. The Turing Test [electronic resource]: http://www.turing.org.uk/scrapbook/test.html, (The date of circulation: 10.10.2015)
3. Bogacheva R. Undetermined problem of the term «AI»[electronic resource]:: file:///C:/Users/Ivan/Downloads/UNDERDETERMINED%20PROBLEM%20OF%20THE%20TERM%C2%ABARTIFICIAL%20INTELLIGENCE%C2%BB.pdf, (The date of circulation: 12.10.2015)
4. Zilberman N. Virtual interlocutors and forms of speech interaction[electronic resource]:: file:///C:/Users/Ivan/Downloads/Virtual%20interlocutors%20and%20forms%20of%20speech%20interaction.pdf, (The date of circulation: 10.10.2015)

Р.А. Богачёва, Д.В. Конышев

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ЧАТ-БОТОВ ПРИ СОЗДАНИИ КОСМИЧЕСКОГО РОБОТА АНДРОНАВТА

ООО «Нейроботикс», Москва, Зеленоград,
r.bogacheva@neurobotics.ru, d.konyshev@neurobotics.ru

Под термином «чат-бот» в общем смысле понимается компьютерная программа-собеседник, имитирующая разговорную речь с одним или несколькими людьми.

Цели работы виртуального собеседника могут быть разными:

– примитивные «болталки», написанные студентами в целях обучения и развлечения;
– коммерческие продукты, как правило, это чат-боты, интегрированные на сайты своих компаний, их задача – помочь клиенту приобрести товар или услугу, получить ответы на

интересующие вопросы, собрать БД о том, кто заходит на сайт, что больше всего интересует людей и т.д.;

– исследовательские проекты, нацеленные на поиск алгоритмов, которые позволят сделать систему интеллектуальной (способной как можно дольше удерживать контекст диалога).

В 50-ые годы XX века, когда формировалось новое научное направление и термин «искусственный интеллект» [3], А.Тьюрингом был предложен тест[2], который мог бы служить одним из критериев определения интеллектуальности машины. Суть теста заключалась в том, что человек-испытатель, сидя в отдельной комнате, переписывался с 2 собеседниками (не видя их), один из которых машина, другой – человек, в ходе диалога испытателю было необходимо определить кто из собеседников машина; испытуемые, в свою очередь, должны убедить, что являются людьми.

С тех пор было написано и испытано немало чат-ботов (психотерапевт Элиза, Parry, A.L.I.C.E., pBot, ChatMaster, ElectronicBrain, Душка, Робот Маришко, Инфы и др.), но, в сущности, их задача не поменялась – имитировать разумный диалог[4], прежде всего, удерживая контекст. Создатели чат-бота, которому удалось пройти тест Тьюринга, пошли дальше – они придумали боту личность – 13-ти летний мальчик из Одессы Евгений Густман, таким образом программа не только могла поддерживать контекст, но и сама задавала его, представившись собеседнику. Манипуляция заключалась в том, что ответов на сложные вопросы подросток не знал или мог «не захотеть» на них отвечать и отшучиваться, в итоге больше 30% жюри поверило, что общается с человеком.

Со второй половины 2014 г. ЦНИИмаш совместно с Нейроботикс начали разработку космического робота для внутрикорабельной деятельности Андронавта. В обязанности робота входит не только традиционная помощь в выполнении рутинны операций по обслуживанию станции и экипажа, но также информационная и психологическая поддержка космонавтов. Таким образом, робот должен стать полноценным собеседником, с которым захотят говорить и даже будут ему доверять. Общение происходит как на вербальном, так и невербальном уровне.

Для качественного невербального общения робот должен быть антропоморфным, обладать возможностями использовать мимику и жесты, а также распознавать и использовать данные получаемые от собеседника (выражение лица, направленность и сфокусированность взгляда, жесты, позы). Поэтому Андронавт имеет лицо, по форме и размеру близкое к человеческому, у него есть глаза, которые за счет изменения формы бровей и подсветки могут выражать эмоции.

Качественное вербальное общение обеспечивается за счет использования технологии чат-бота.

Для обеспечения взаимодействия с человеком и получения информации об окружающем пространстве робот оснащен различными сенсорами и устройствами ввода-вывода:

1. Массив микрофонов позволяет воспринимать речь собеседника, а также локализовывать источник звука;
2. Стереокамеры – обеспечивают функцию системы трехмерного технического зрения (СТТЗ);
3. Актуаторы тела (шея, руки, торс) позволяют использовать невербальный интерфейс «языка тела» (кивание, жесты рук, положение спины);
4. Динамик позволяет воспроизводить речь робота (сгенерированную или записанную) или другие аудиосигналы (музыка, будильник);
5. Мимический аппарат на основе светодиодов в области глаз и бровей, позволяет в упрощенном виде отображать имитируемые роботом эмоциональные состояния (радость, грусть, удивление, внимательность и другие). Выступает также индикатором состояния робота (загрузка системы, обработка данных);
6. Отстегиваемый планшет на груди робота позволяет в расширенном виде имитировать мимику, показывать различные медиа файлы (видео, изображения, текст), а также является пультом настройки робота.

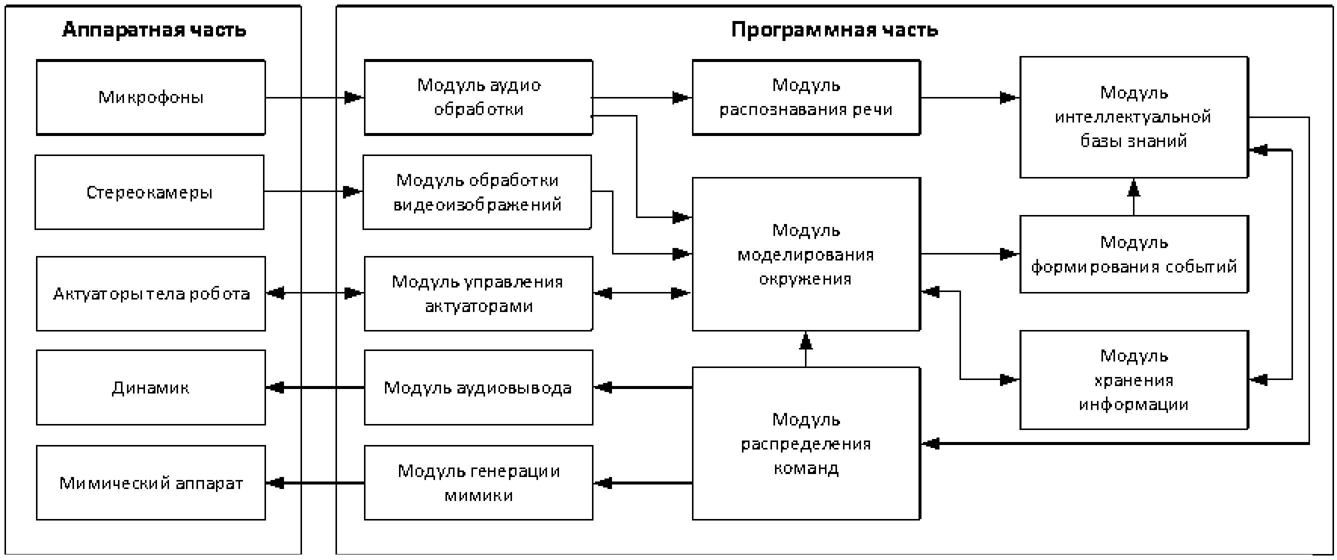


Рис. 1. Структурная схема интеллектуальных подсистем ввода-вывода и обработки

Для обеспечения информационной (ИП) и психологической поддержки (ПП) сервисный робот (СР) должен обеспечивать базовый набор функций. Первостепенными из них являются:

1. Распознавание речи – перевод аудио-сигнала речи человека в текст для дальнейшей обработки;
2. Детекция лиц – нахождение лиц людей в области видимости камер робота;
3. Генерация речи –создание аудиосигнала, имитирующего речь человека.

Эти базовые функции проработаны на высоком уровне и содержатся в большом количестве библиотек и приложений. Принципы их работы являются несущественными, т.к. результат регламентирован международными программными стандартами.

Для наглядности можно привести простой диалог, который должна отрабатывать система:

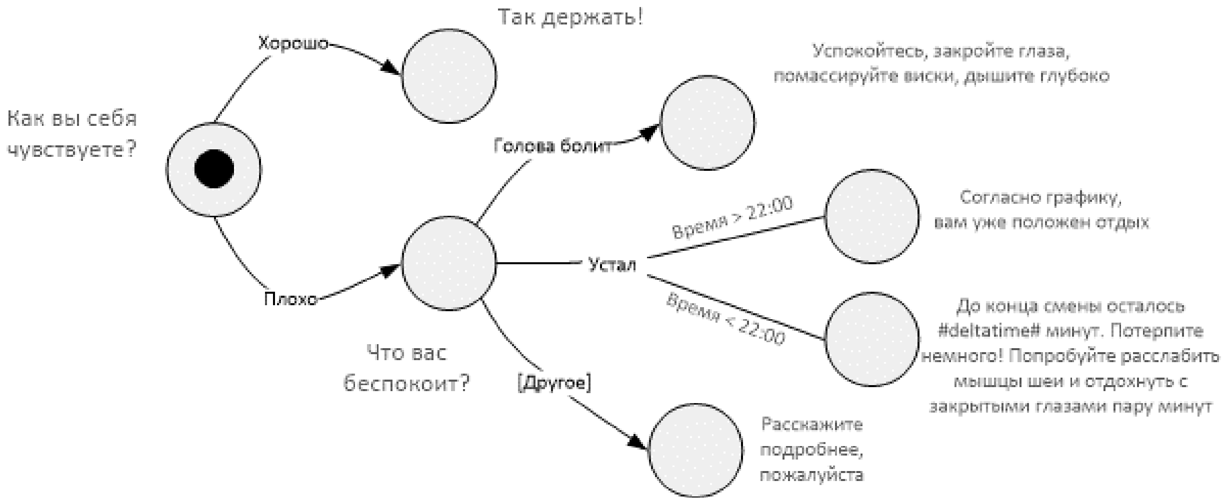


Рис. 2. Пример диалоговой ситуации с чат-ботом

Наиболее важной частью робота, обеспечивающей интерактивное взаимодействие (в том числе ИП и ПП), является модуль интеллектуальной базы знаний (ИБЗ). Этот модуль принимает на вход сообщения из двух источников: модуля распознавания речи и модуля моделирующего окружение.

В основную структуру входят 2 модуля:

1. Модуль поиска текстового паттерна
2. Модуль подготовки ответа

Результатом работы ИБЗ является составление набора внутренних команд действий. К таким командами относятся:

– изменение внутренних состояний (в простейшем случае – изменение переменных);
– генерация речи;
– запрос на изменение положения частей тела СР;
– изменение состояния мимического аппарата;
– управление различными подсистемами СР.

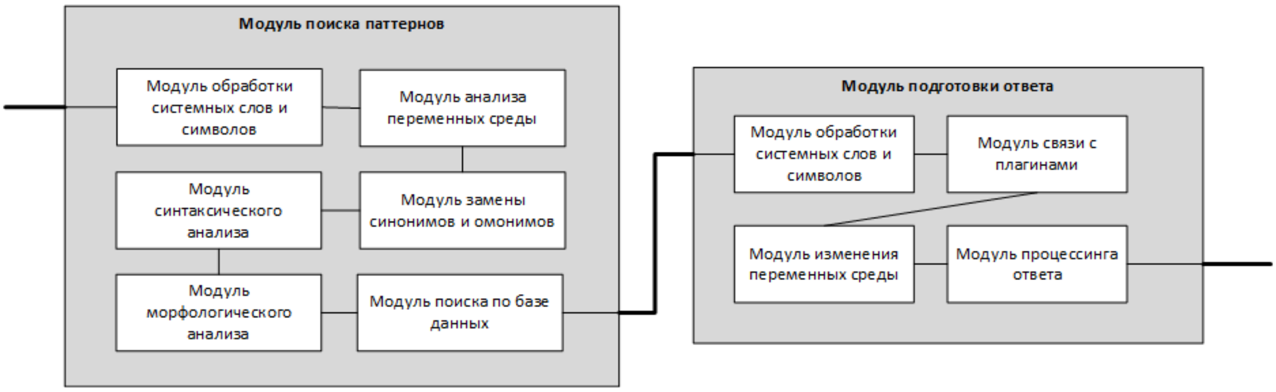


Рис 3. Структурная схема ИБЗ

В целом, структура ИБЗ представляет собой множество комплексных поведенческих инструкций (КПИ). КПИ представляет собой в общем случае связное множество элементов, имеющих команды, выполняемые при переходе к этому элементу, входы и переходы к другим элементам. Для унификации все команды и входы записываются в текстовом виде. Каждая КПИ имеет «мощность», т.е. приоритет перед остальными КПИ.

Структура ИБЗ схожа со структурой недетерминированных конечных автоматов. Однако есть существенные отличия от классических конечных автоматов:

– Текущая КПИ (т.е. состояние, в которой может находится ИБЗ) может быть изменена на другую, в случае, когда мощность входа у другой КПИ превышает мощность текущей. Это позволяет прерывать выполнение текущей КПИ более приоритетными состояниями и при этом иметь однотипный для редактора-оператора вид.
– Одновременно ИБЗ находится в нескольких непосредственно не связанных состояниях. Это необходимо для более гибкого и емкого режима работы внутреннего состояния ИБЗ, имитирующую тем самым психоэмоциональное состояние человека.

В общем случае КПИ имеет возможность с помощью специального скриптового языка управлять всеми подсистемами робота. В качестве примера можно привести: обновление внутренней переменной, изменение состояния мимического аппарата, смена режимов работы.В самом простом случае КПИ имеет одно состояние, которое представляет собой ответ робота на простой запрос.

Входная последовательность имеет ряд специальных синтаксических конструкций:

– (звездочка) – заменяет любой текст
  Пример запроса: «* как дела *». В данном случае этот запрос будет выбран в любой из предложений: «Робот, как дела?», «Скажи пожалуйста, как дела, робот?», «Как дела?»
– *=A – переводит любой текст во временную переменную
  Пример: «А меня зовут *=A» в результате обработки распознанной речи «А меня зовут Вася», во временную переменную «А» попадет значение «Вася».
– [A|B|C…] – позволяет использовать любой из записанных вариантов (A,B,C…) в качестве валидной строки
  Пример: «[Что ты знаешь о|Что такое] *=A» работает во фразах: «Что ты знаешь о стыковочном модуле» и «Что такое герметичность».
– *varname – заменяет эту подстроку на значение переменной «varname» из переменных ИБЗ. Пример: «Мы сейчас находимся в *location.city?» сработает, например, при значении переменной «location.city» равной «Москва» и вопросе «Мы сейчас находимся в Москве?»

К ответу также применяется ряд специальных синтаксических конструкций, позволяющих:

– Выбирать случайное слово из синонимов для воспроизведения более разнообразной речи робота
  Пример: запись «[Привет|Здравствуй]» в случайном порядке выбирает одно из этих слов
– Использовать подключаемые модули (плагины) для решения более частных задач
  Пример: «wiki({A})» - плагин общения с википедией пытается по интернету получить определение слова, содержащегося в переменной {A}
– Использовать логические выражения для выбора наиболее подходящего ответа
  Пример: «if (location == "Москва")»

Описанные выше методы позволяют адаптировать базу знаний робота для работы сразу в двух режимах:

– Естественноязыковом –отработка запросов с плавающей грамматикой

– Командном – отработка запросов с четкой грамматикой (например, «Открой документ о ремонте бортового компьютера»)

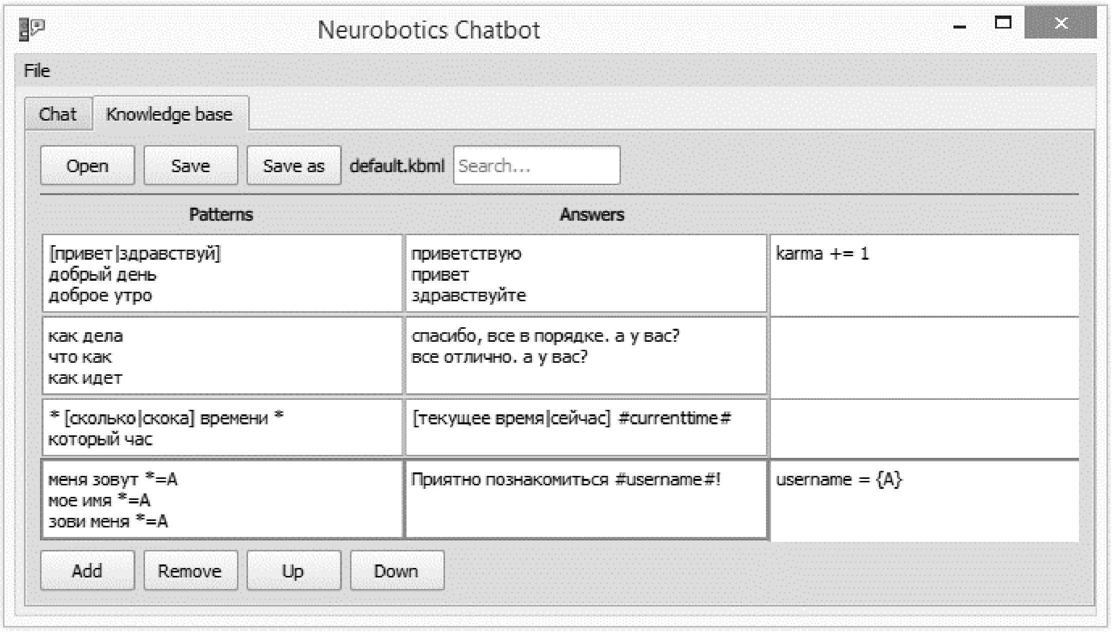


Рис 4. Пример программной реализации вопросно-ответных форм

Разработанная система использует модульный подход во всех элементах. Это позволяет легко обновлять, отключать и настраивать отдельные подсистемы. Таким образом разработанная система создает специализированную экосистему выполнения различных операций по обработке и анализу текста, унифицированного общения с одним подсистем с другими.

Экспериментальные исследования проводились на выставках StartupVillage 2015 и «Бал роботов» 2015. В ходе экспериментов система проявила устойчивые свойства работы и позволила собеседниками робота (посетителям выставки) проводить диалог. В ходе этих экспериментальных исследований были разработаны специальные синтаксические правила для сглаживаниях ошибок при распознавании речи.

1. ALICEBOT[Электронный ресурс]:http://www.alicebot.org/, (дата обращения: 11.06.2015)
2. TheTuringTest [Электронный ресурс]: http://www.turing.org.uk/scrapbook/test.html, (дата обращения: 10.06.2015)
3. Богачёва Р.А. Проблема недоопределенности значения термина «искусственный интеллект» // Гуманитарная информатика № 6 [Электронный ресурс]: file:///C:/Users/Ivan/Downloads/UNDERDETERMINED%20PROBLEM%20OF%20THE%20TERM%C2%ABARTIFICIAL%20INTELLIGENCE%C2%BB.pdf, (дата обращения: 12.06.2015)
4. Зильберман Н.Н. Технологии виртуальных собеседников и формы речевого взаимодействия // Гуманитарная информатика № 5 [Электронный ресурс]: file:///C:/Users/Ivan/Downloads/Virtual%20interlocutors%20and%20forms%20of%20speech%20interaction.pdf, (дата обращения: 10.06.2015)

Е.И. Татаренко[1], С.А. Гафуров[2], В.А. Волкова[2]

РАЗРАБОТКА ВОЛНОВОГО ГЛАЙДЕРА

[1]Самарский государственный технический университет, Самара, Россия
comandor239@mail.ru

[2]Самарский государственный аэрокосмический университет, Самара, Россия
sa.gafurov@gmail.com, erroneo93@yandex.ru

Введение

В 2013-2014 годах сотрудниками кафедры "Информационно-измерительная техника" Самарского государственного технического университета (СамГТУ) при участии учѐных Самарского аэрокосмического университета (СГАУ), Санкт-Петербургского государственного морского технического университета (СПбГМТУ) и ЗАО "НПП ПТ "ОКЕАНОС"" была разработана, изготовлена и успешно испытана в натурных условиях дистанционно роботизированная управляемая платформа для наблюдений за океаном - волновой глайдер (Wave Glider). Этот аппарат использует для своего движения энергию волн. Этот глайдер содержит два связанных между собой блока: надводную часть, обеспечивающую непрерывную связь с аппаратом и поступление дополнительной энергии от солнечных батарей, и подводную часть, содержащую крыльевые элементы, которые преобразуют энергию волнового движения в поступательное движение аппарата. Более подробное описание принципа действия аппаратов можно найти в работах [1, 2].

В статье приводятся общие критерии выбора основных технических решений, положенных в основу конструкции глайдера, и пример их практической реализации.

Краткий анализ движения системы при волнующейся поверхности

Волновой глайдер можно рассматривать как двухзвенный преобразователь энергии волн в энергию поступательного движения аппарата [3].

Между подводной и надводной частями аппарата всегда есть сила натяжения троса. При этом при подъёме надводной части вследствие наличия волны, сила натяжения изменяется, что приводит к тому, что сумма силы натяжения троса и выталкивающей силы становится больше суммы сил тяжести, действующей на оба тела (силой тяжести троса можно пренебречь) и силы гидродинамического сопротивления подводной части аппарата.

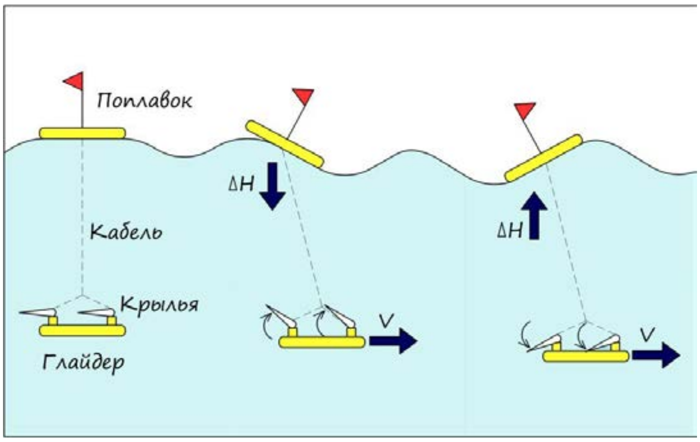


Рис. 1. Принцип движения волнового глайдера

Далее покажем соотношения, определяющие скорость перемещения волнового глайдера в зависимости от характера волнения.

Согласно линейной теории волн [4], уравнение профиля волны может быть записано в виде:

$$z = -A \cdot \cos(kx + \sigma t), \tag{1}$$

где A - амплитуда волны;

k - пространственная частота;

σ- временная частота.

Вертикальная составляющая скорости частиц воды вблизи поверхности является первой производной от перемещения:

$$U_z = \frac{dz}{dt} = A\sigma \sin(kx + \sigma t), \tag{2}$$

Для простоты анализа примем за скорость подъема системы на волне среднюю скорость, т. е. отношение высоты волны H=2A к половине периода волны, T, (времени подъема или спуска):

$$V_{ср} = \frac{2A}{T/_2} = \frac{4A}{T} = \frac{2H}{T} \tag{3}$$

Оценим гидродинамические составляющие сил, действующих на подводную часть системы.

При подъеме системы вверх со средней скоростью, $V_{ср}$ возникает гидродинамическая сила сопротивления движению - F:

$$F = c\frac{\rho V_{ср}}{2}s, \tag{4}$$

где c – коэффициент сопротивления;

S – площадь крыльев подводной части;

ρ – плотность жидкости.

В рассматриваемом случае выбрано крыло прямоугольной формы, тогда

$$S = nL_{кр}h_{кр},$$

где n – число крыльев;
S – длина крыла;
$L_{кр}$ – длина крыла
$h_{кр}$ – хорда (ширина) крыла.

Так как конструкцией преобразования энергии волн предусматривается свободное (под действием набегающего потока воды) перекладывание крыльев до упора в диапазоне $\pm\alpha$ (где α – угол перекладывания крыльев относительно продольной оси аппарата), то вертикальная составляющая этой силы может быть записана как:

$$F_{верт} = c_в \frac{\rho V_{ср}^2}{2} s \cdot cos\alpha \qquad (5)$$

Горизонтальная составляющая этой силы составляет:

$$F_{гор} = c_2 \frac{\rho V_{гор}^2}{2} s \cdot sin\alpha \qquad (6)$$

Из выражения (6) может быть найдена скорость горизонтального помещения подводной части $V_{гор}$:

$$V_{гор}^2 = \frac{2F_{гор}}{c_2 \rho s \cdot sin_\alpha} \qquad (7)$$

Горизонтальная и вертикальная составляющие силы сопротивления F связаны соотношением:

$$F_{гор} = F_{верт} \cdot tg\alpha, \qquad (8)$$

Следовательно:

$$V_{гор}^2 = \frac{2F_{верт} \cdot tg\alpha}{c_{гор}\rho s \cdot sin\alpha} = \frac{c_{верт}}{c_{гор}} \left(\frac{2H}{T}\right)^2 \qquad (9)$$

Гидродинамические коэффициенты $c_{верт}$ и $c_{гор}$определяются экспериментально.

Описание конструкции разработанного волнового глайдера

Описываемый глайдер проектировался как экспериментальная исследовательская платформа для отработки конструкции и возможных алгоритмов его функционирования.

В качестве надводной части (Рис. 2), плавающей на поверхности воды, в рассматриваемом проекте использована доска для виндсѐрфинга, имеющая удачные для построения системы водоизмещение, форму и конструкцию. Она изготовлена из стеклопластика с заполнением из пенопласта и имеет длину 3,6 м. и ширину 0,6 м.

На поверхности доски в герметичном пластиковом контейнере размещены аккумуляторные батареи и все электронное оборудование, включающее в себя навигационную, приемно-передающую подсистемы и вычислительное устройство. На поверхности доски предусмотрено также размещение солнечных панелей.

Подводная часть глайдера (Рис. 2) состоит из вертикальной рамы, выполненной из двух скрепленных между собой пластин нержавеющей стали с заполнением промежутка между ними вспененным полистиролом толщиной 10 мм.

Рис. 2. Внешний вид разработанного волнового глайдера

Рама имеет сквозные профилированные окна, в которые на шарнирах вставлены шесть свободно перекладываемых крыльев. Крылья плоские, выполнены из трехслойного алюминий-пластикового композита толщиной 3 мм. Общая площадь крыльев – 0,48 м^2, профиль окон позволяет изменять угол перекладывания крыльев в диапазоне $\pm35°$.

В нижней части рамы закреплен цилиндрический герметичный прочный корпус полезным объемом 3 л. для размещения электронной исследовательской аппаратуры. Носовой и кормовой обтекатели прочного корпуса выполняют функции утяжелителей.

В кормовой части рамы аппарата размещен серводвигатель, выполняющий функцию руля направления.

Блок электроники (Рис. 3) подводного модуля включает в себя подсистему контроля курса/крена/дифферента и электрический привод руля направления. Здесь же расположены датчики глубины, температуры и затекания прочного корпуса.

Рис. 3. Блок электроники подводного модуля

Для увеличения тяги при необходимости преодолеть встречное течение, увеличить скорость или резко изменить направление движения, в съемном кормовом обтекателе предусмотрено размещение тягового электродвигателя, вращающего складной гребной винт. Однако в описываемой конструкции вместо винтового движителя он оснащен специальным устройством, расположенным в надводной части и представляющим собой механический подъемник - имитатор волны. Имитатор волны периодически, по командам микроконтроллера системы управления, перемещает подводную часть вверх и вниз, тем самым заставляя всю систему двигаться вперед. Указанное устройство дает возможность проводить натурные эксперименты с глайдером в условиях полного штиля. Волновой глайдер в действии показан на Рис. 4.

Рис. 4. Испытание волнового глайдера на реке Волга
а – надводный модуль; б – подводный модуль

Подсистема управления и телеизмерений волнового глайдера

Подсистема управления и телеизмерений волнового глайдра решает следующие задачи, распределенные между тремя микроконтроллерами:

– прием и передача данных с компьютера пользователя Центра управления аппаратом (ЦУП). Структурная схема ЦУП показана на Рис. 5;
– формирование пакетов данных для передачи по радиоканалу;
– прием данных с аппарата (ПА) по радиоканалу и контроль качества радиосвязи;
– формирование сигналов управления имитатором волны и контроль работы электролебедки;
– поддержка протокола обмена данными по кабелю связи между надводным и подводным модулями;
– управление рулевым серводвигателем для изменения направления перемещения глайдера;
– измерение бортовых параметров: гидростатического давления, температуры, напряжения бортовой сети, контроль затекания;
– обмен данными с электронным компасом и акселерометром.

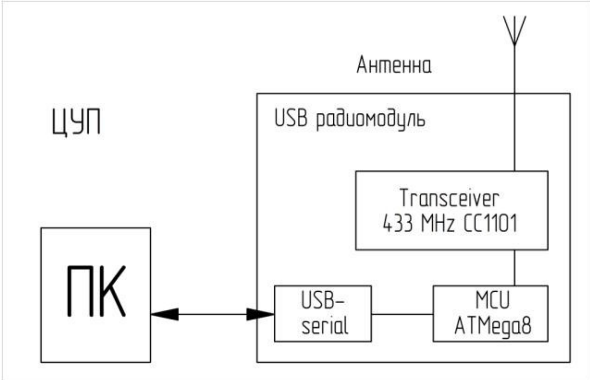


Рис. 5. Структурная схема ЦУП

Для решения указанных задач в системе используются микроконтроллеры Atmel ATMega8, радиотрансиверы, выполненные на базе CC1101, датчик абсолютного давления MPX Motorola, акселерометр-магнитометр LMH303.

Обмен данными между ЦУП и аппаратом анализирует ЦУП, посылая запрос через USB-порт. Далее USB-радиомодуль формирует пакет данных и передает его через радиоканал надводному модулю (НМ). Контроллер НМ устанавливает режим имитатора волны в соответствии с полученным запросом и поддерживает заданный режим работы автоматически до его отмены. Далее, после получения запроса от ЦУП, НМ посылает запрос на контроллер подводного модуля (ПМ); подводный модуль устанавливает положение рулевой сервомашины в соответствии с данными из ЦУП и отсылает блок данных, содержащий значения с датчиков ПМ (температура, давление, напряжение бортовой сети, наличие затекания, показания компаса и акселерометра). НМ, получив ответный пакет данных от ПМ, дополняет его информацией о качестве радиосвязи и отправляет по USB на ПК ЦУП.

Обмен данными осуществляется несколько раз за секунду, что позволяет управлять направлением движения ПА и фиксировать гидродинамические характеристики ПА на ПК ЦУП. Структуры систем управления надводного и подводного модулей приведены на Рис. 6 и 7.

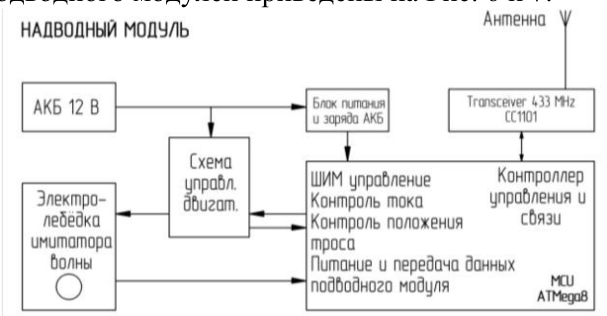


Рис. 6. Структура системы управления надводного модуля

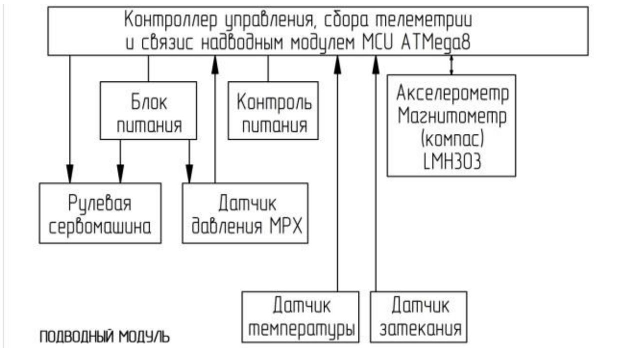


Рис. 7. Структура системы управления подводного модуля

Заключение

Описанный в данной работе аппарат успешно испытан в натурных условиях на р. Волга в 2013-2014 г. Спроектированный аппарат способен достигать скорости в 4 м/с при безветренной погоде. При этом он обладает неограниченным запасом хода и имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционными подводными аппаратами. Полученный аппарат позволяет выполнять мониторинг акваторий, вести замеры акустических и температурных данных. Мониторить измерение полей давления и скоростей, необходимые для метеорологических замеров.

1. Eriksen C.C., Osse T.J., Light R.D., Wen T., Lehman T.W., Sabin P.L., Ballard J.W. and Chiodi A.M. Seaglider: A long-range autonomous underwater vehicles for oceanographic research // IEEE Journal of Oceanic Engineering. -2001. – 26(4). – pp. 424 – 446
2. Davis R.E., Eriksen C.C., Jones C.P. Autonomous Buoyancy-Driven Underwater Vehicles, 2002, pp. 37-58
3. Вершинский Н.В. Энергия океана. – М. Наука, 1986
4. Кочин Н.Е., Кибель И.А., Розе Н.В. Теоретическая гидромеханика. – М.: Физматгиз, 1963, ч.1.

M. Kirina, V. Sychev, A. Churikov, A. Divin

ROBOTIC COMPLEX FOR THERMAL NON-DESTRUCTIVE EXPRESS-CONTROL OF VERTICAL AND HORIZONTAL SECTIONS OF PRODUCTS

Tambov State Technical University
slyfox197@rambler.ru, flyholand@mail.ru, alex@chur.tstu.ru, agdv@yandex.ru

М.В. Кирина, В.А. Сычев, А.А. Чуриков, А.Г. Дивин

РОБОТИЗИРОВАННЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ТЕПЛОВОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО ЭКСПРЕСС-КОНТРОЛЯ ВЕРТИКАЛЬНЫХ И ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ УЧАСТКОВ ИЗДЕЛИЙ

ФГБОУ ВПО «ТГТУ», Тамбов
slyfox197@rambler.ru, flyholand@mail.ru, alex@chur.tstu.ru, agdv@yandex.ru

Аннотация

Проведены теоретические и экспериментальные исследования работоспособности тепловой инспекционной робототехнической системы. Система состоит из модулей горизонтального и вертикального перемещений, технологической платформы с установленной на ней измерительным и инспекционным оборудованием и подсистемы управления движением и измерениями. Технологический комплекс неразрушающего теплового контроля (НТК) является одним из основных компонентов проекта по созданию комплексной системы диагностики внешних теплоизоляционных свойств. Ранее метод и измерительный мобильный зонд НТК был использован при контроле свойств элементов внешней теплоизоляции космического челнока «Буран» в ручном режиме.

Ключевые слова: неразрушающий тепловой контроль, технологические роботы вертикального и горизонтального перемещения, импульсные методы, неразрушающий экспресс-контроль (НЭК), теплофизические свойства (ТФС), теплоизоляционные материалы, расчетные зависимости, измерительная мехатронная система.

Введение

Одними из важнейших качественных характеристик материалов являются их теплофизические свойства (ТФС), такие как теплоемкость, теплопроводность и температуропроводность. Современные методы и средства измерения позволяют оперативно определять теплофизические свойства, не подвергая материал разрушению. С целью определения качества изделий необходимо измерение теплофизических свойств в нескольких участках, подверженных повреждениям и потере тепловых свойств, например, на участках ближе к краю и по центру. Для ответственных изделий контроль должен быть сплошным, и потому он будет требовать значительных трудовых и временных ресурсов. Поэтому для таких изделий целесообразно использование контроля с применением мобильных роботов [1, 2].

Мобильные роботы используются в промышленности, космонавтике, вооруженных силах и др. в том числе и экстремальных условиях. Одним из относительно новых направлений в развитии мобильных роботов является создание технологических роботов вертикального перемещения (ТРВП).

Как правило, снятие показаний ТФС предусматривает ручной труд, при этом человек длительное время совершает монотонную работу, что сказывается на его утомляемости и снижению эффективности работы в целом. Поэтому наша задача разработать робототехническую систему контроля свойств участка горизонтальной и вертикальной поверхности изделий и автоматизировать данный технологический процесс. Для этого требуется разработать манипулятор, передвигающийся по заданной траектории по поверхности материала для снятия показаний датчика. Необходимость создания ТРВП и робототехнических комплексов на их базе определяется возросшими требованиями к выполнению технологических операций и условиями, в которых человеку опасно находиться или сложно выполнять действия самому. Таким образом, для исследования тепловых свойств участка поверхности изделий наиболее подходящий для нас, с точки зрения оперативности, представляют информационно-измерительные системы (ИИС), реализующие импульсные методы, позволяющие осуществлять неразрушающий экспресс-контроль (НЭК) ТФС твердых материалов.

1 Испытательный стол

Для проверки работоспособности метода НК ТФС изделий из теплоизоляционных материалов разработана робототехническая установка «Испытательный стол», изображенная на Рис. 1. Измерения проводятся по отдельным точкам термограмм. За основу робототехнической установки был выбран стол, выпускаемый на заводе «Twitte».

На Рис. 1 отмечено цифрами 1-стол, 2-координатное передвижение, 3-мобильный измерительный зонд (МИЗ). Общий вид МИЗ изображен на Рис. 2, который является основным измерителем.

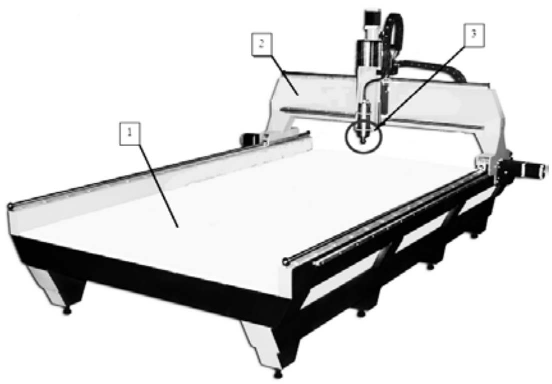
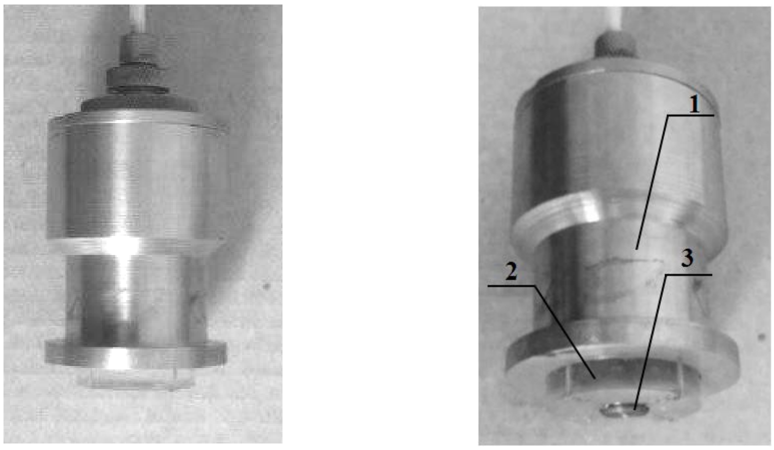


Рис. 1. Испытательный стол



а) б)

Рис. 2. Мобильный измерительный зонд

а) общий вид; б) измерительный блок в составе: 1 – металлический корпус. 2 – эталонный сравнительный образец. 3 – оригинальный блок, содержащий: интегральный датчик температуры, плоский круглый датчик теплового потока, плоский круглый нагреватель

2 Модель и принцип работы

Тепловому контролю подлежат образцы различных, но весьма небольших размеров, следовательно, наиболее приемлемым будет моделирование исследуемого образца в виде полуограниченного тела. Организацию нагрева полуограниченного тела наиболее просто осуществить через участок простейшей геометрической формы, поэтому мы выбираем круг как участок поверхности исследуемого образца, через который поступает тепловой поток.

Для решения многомерных задач теплопроводности используем аппарат интегральных характеристик температуры и теплового потока [3-6].

Математические модели относительного и абсолютного методов неразрушающего контроля комплекса теплофизических свойств (теплопроводности и температуропроводности), предполагают тепловое воздействие постоянным во времени тепловым потоком плотностью $q(t) \equiv q = \text{const}$.

В этих методах основным экспериментальным параметром является временная интегральная характеристика температуры поверхности нагреваемого образца вида:

$$S^*(p) = \int_0^\infty e^{-p \cdot t} \cdot S(t)dt, p > 0,$$

где $S(t)$ - измеряемая средне-интегральная температура нагреваемого круга, p - параметр преобразования Лапласа.

Для абсолютного метода определения теплофизических свойств, предполагаем, что в эксперименте выполняются следующие условия:

– исследуемое тело по отношению к тепловому воздействию является полуограниченным $0 \le z < \infty$, $0 \le r < \infty$ (Рис. 3);
– тепловой поток постоянной по координате r плотности $q\ (t,\ r) \equiv q(t)$ подводится к телу через круглый участок $0 \le r < R$ поверхности $z = 0$ (рисунок 1);
– тепловой поток ограничен во времени $q(t) = \begin{cases} q(t)\ \textit{при}\ t \le t_2, \\ 0\ \textit{при}\ t > t_2; \end{cases}$
– тело имеет постоянную начальную температуру (считаем ее равной нулю).

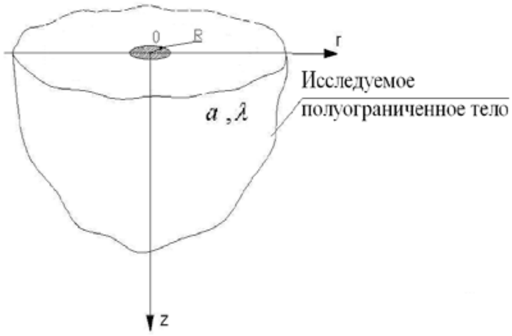


Рис. 3. Модель измерительного блока для абсолютного метода НК теплофизических свойств

При указанных допущениях температурное поле в исследуемом полуограниченном теле будет описываться решением следующей осесимметричной краевой задачи:

$$\frac{1}{a} \cdot \frac{\partial U(t,r,z)}{\partial t} = \frac{\partial^2 U(t,r,z)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial U(t,r,z)}{\partial r} + \frac{\partial^2 U(t,r,z)}{\partial z^2},$$

$$(t > 0,\ 0 \le r < \infty,\ 0 \le z < \infty);$$

Величину теплопроводности материала находим из по формуле:

$$\lambda = \frac{2 \cdot R \cdot q^*(p)(1 - e^{-t_2 \cdot p})}{S^*(p)} V(g(p)).$$

Для расчета величин теплопроводности и температуропроводности требуется экспериментальное определение теплового потока, направленного в исследуемое тело. Это связано с решение трудной технической задачи создания малоинерционного датчика теплового потока и внедрения его в конструкцию прибора. Такая проблема отсутствует в относительных методах определения теплофизических свойств материалов, в которых не требуется измерение теплового потока, направленного в исследуемое тело.

Математическая модель для относительного метода определения теплофизических свойств предполагает наличие двух полуограниченных тел, соприкасающихся в плоскости $z = 0$, причем значения величин теплопроводности $\lambda_э$ и температуропроводности $a_э$ верхнего тела известны и постоянны.

Рис.4. Модель измерительного блока для относительного метода НК теплофизических свойств

Предполагаем, что в эксперименте выполняются следующие условия:

– исследуемое ($0 \le z < \infty$, $0 \le r < \infty$) и сравниваемое ($0 \le r < \infty$, $-\infty < z \le 0$) тела по отношению к тепловому воздействию являются полуограниченными (рисунок 4);
– в плоскости контакта действует источник тепла в виде круга $0 \le r < R$, выделяющий удельный тепловой поток Q(t), причем теплообмен между телами пренебрежимо мал и тепловые потоки, направленные каждый в одно соответствующее тело от источника тепла, имеют постоянные по координате r плотности $q(t,r) \equiv q(t)$ и $q_э(t,r) \equiv q_э(t)$, $q(t) + q_э(t) = Q(t)$
– удельный тепловой поток Q(t), а, следовательно, и тепловые потоки $q(t)$, $q_э(t)$ ограничены во времени

$$q(t) = \begin{cases} q(t)\ при\ t \le t_2, \\ 0\ при\ t > t_2; \end{cases} \quad и \quad q_э(t) = \begin{cases} q_э(t)\ при\ t \le t_2, \\ 0\ при\ t > t_2; \end{cases}$$

– в плоскости контакта $z = 0$ температура исследуемого тела равна температуре сравниваемого тела.
– тела имеют постоянную одинаковую начальную температуру (считаем ее равной нулю).

При данных допущениях температурное поле двух соприкасающихся полуограниченных тел будет описываться решением следующей осесимметричной краевой задачи:

$$\frac{1}{a}\cdot\frac{\partial U(t,r,z)}{\partial t} = \frac{\partial^2 U(t,r,z)}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\cdot\frac{\partial U(t,r,z)}{\partial r} + \frac{\partial^2 U(t,r,z)}{\partial z^2},$$

$$(t > 0,\ 0 \le r < \infty,\ 0 \le z < +\infty);$$

Величину теплопроводности материала находим по формуле:

$$\lambda = 2\cdot R\cdot\left(\frac{Q^*(p)(1-e^{-t_2\cdot p})}{S^*(p)} - \frac{\lambda_э}{2\cdot R\cdot V(g_э(p))}\right)V(g(p))\cdot$$

Для определения значений величин теплопроводности λ исследуемого тела необходимо знать значения интегральных характеристик температуры, а также значения интегральной характеристики удельной тепловой мощности, выделяемой плоским круглым нагревателем (эта мощность в процессе эксперимента задается).

2.1 Блок управления испытательным столом

Измерительная мехатронная система управляется с помощью микроконтроллера ATmega по заданному алгоритму проведения НК ТФС в точках, определенных оператором или в точках, где эксплуатируется изделия, задаваемых технологом. Блок-схема управления испытательным столом изображена на Рис. 5.

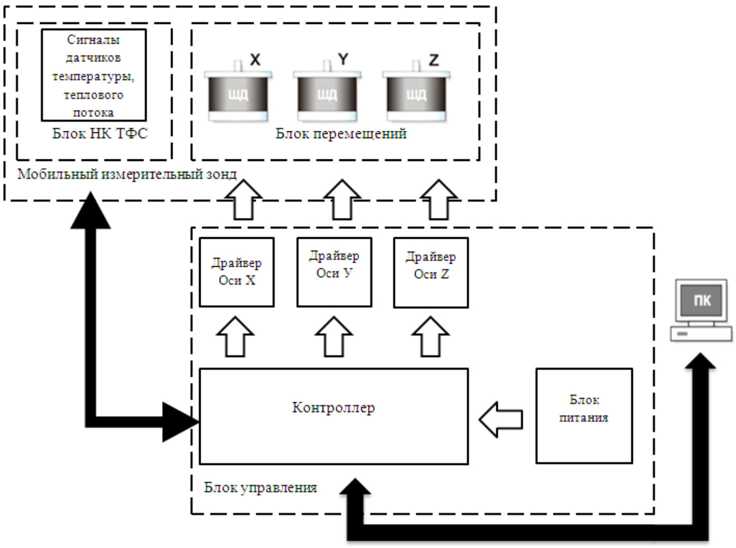


Рис.5. Блок-схема управления роботизированным испытательным столом для НЭК ТФС участка горизонтальной или вертикальной поверхности изделий

Заключение

Таким образом, благодаря применению манипуляторов автоматизированной робототехнической измерительной системы, нет необходимости использовать ручной труд оператора, вносящий значительную погрешность в измерение ТФС. Кроме этого оператор освобождается от монотонной работы часто в экстремальных условиях. Автоматизация процесса контроля после небольшой модернизации позволит в принципе стабилизировать основные внешние мешающие факторы, такие как сила прижатия измерительного зонда к поверхности исследуемого образца и др. и таким образом значительно повысить точность контроля.

1. Russell, R. Andrew; Paoloni, Frank J. A. Robot Sensor for Measuring Thermal Properties of Gripped Objects. // Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on (Volume: IM-34, Issue: 3). Sept. 1985. Page(s): 458 – 460.
2. Градецкий В.Г., Рачков М.Ю. Роботы вертикального перемещения – М.: Тип. Мин. Образования РФ. 1997. – 223 с.
3. Кирина М.В., Сычев В.А., Чуриков А.А., Расчетные зависимости абсолютного и относительного методов определения теплопроводности твердых и дисперсных материалов// Труды ТГТУ. - Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2015, Вып. 41.
4. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высш. школа, 1967.
5. Чуриков А.А. Разработка и исследование методов и устройств для автоматического неразрушающего контроля температурозависимых теплофизических свойств твердых теплозащитных материалов: Дис. ... канд.техн.наук. – М.: МИХМ, 1980.
6. Карташов Э.М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел. – М.: Высшая школа, 2001.

G. Novikov

EFFECTIVENESS DETERMINATION, STRUCTURE DEVELOPMENT AND ASSESSING THE AEROSPACE MONITORING SYSTEM IN PREPARATION AND HOLDING OF THE 2014 OLYMPICS IN SOCHI

«EKA» joint-stock company
eka@oaoeka.ru

Г.С. Новиков

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ, РАЗРАБОТКА СТРУКТУРЫ И ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМЫ АВИАЦИОННО-КОСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА (САКМ) ПРИ ПОДГОТОВКЕ И ПРОВЕДЕНИИ ОЛИМПИАДЫ В Г. СОЧИ В 2014 Г.

АО «ЭКА», Королёв
eka@oaoeka.ru

Аннотация

В статье рассматривается метод определения эффективности САКМ при создании и эксплуатации Олимпийского комплекса. Подробно изложен подход к оценке методической достоверности мониторинга САКМ.
Получено, что наибольшая достоверность мониторинга достигается при практически мгновенном съёме с объектов Олимпийского комплекса мониторинговой информации, что послужило основой для принятия решения о построении ОК с сосредоточенной инфраструктурой. В качестве альтернативы рассматривался вариант ОК с рассредоточенной инфраструктурой с объектами, например, на искусственно созданных островках.

Введение

САКМ представляет собой сложную кибернетическую систему, включающую в свой состав наземный, авиационный и космический сегменты. Наземный сегмент содержит экстремальные робототехнические системы, каковыми являются «Система искусственного разумного зрения» и Система «искусственная разумная рука». Эффективность САКМ в значительной степени определяется методической достоверностью, в особенности, когда инструментальная составляющая достоверности характеризуется высокой точностью функционирования элементов САКМ. В статье определяется методическая достоверность в зависимости от метода получения мониторинговой информации от объектов ОК.

1. Постановка задачи и выбор критериев эффективности САКМ

Основной целью создания САКМ Олимпийского Комплекса (ОК) является обеспечение требований Федерального закона от 30 октября 2007 г. №238-238-ФЗ (гл.5) «О государственной корпорации по строительству олимпийских объектов и развитию г. Сочи как горноклиматического курорта». При строительстве и эксплуатации сложного олимпийского комплекса в г. Сочи, состоящего из трёхсот объектов, расположенных, как в условиях горного ландшафта, соседствующего с морем, так и в подтопляемой Имеретинской низменности, необходимо было разработать эффективную контролирующую систему, соответствующую всему многообразию объектов Олимпийского комплекса.

2. Общая характеристика объектов мониторинга

Объекты мониторинга САКМ можно разделить на 3 группы:

2.1. Сочи, включающий объекты застройки, связанные с олимпийским строительством и развитием инфраструктуры города как горноклиматического курорта;

2.2. Прибрежный кластер «Олимпийский парк», включающий:

- олимпийский стадион, (40 тысяч сидячих мест);
- конькобежный центр (8 тысяч сидячих мест);
- ледовая арена для керлинга (3 тысячи сидячих мест);
- тренировочная база олимпийского комитета России;
- национальный олимпийский и параолимпийский центр для тренировок и соревнований;
- большая ледовая арена для хоккея с шайбой (12 тысяч сидячих мест);
- малая ледовая арена для хоккея с шайбой (7 тысяч сидячих мест).

2.3 Горный кластер («Красная Поляна»), включающий:

- горнолыжные курорты: «Роза Хутор», «Альпика Сервис», «Хребет Псехако» (5-8 тысяч сидячих + 10 тысяч стоячих мест).
- санно - бобслейная трасса (10 тысяч стоячих мест).
- трамплины К-90 и К-120 (5 тысяч сидячих мест + 10 тысяч стоячих мест).

3. Теоретическое обоснование структуры системы мониторинга

Стандартные методы технического обеспечения безопасности при строительстве и эксплуатации олимпийских объектов (инженерно-геодезические, экологические и другие) недостаточны для выявления и устранения явных и скрытых угроз городским и олимпийским объектам г. Сочи.

Стандартные мероприятия не позволяют вести оперативное наблюдение процессов, происходящих в геологической среде, например, образование разломов в горной породе, снежных лавин, созревших для обвала, водных линз под поверхностью земли в местах застройки, приводящих к разрушению зданий.

Данные методы не обеспечивают точных прогнозов по времени и масштабам схода снежных лавин, оползней в местах застройки и разрушений построенных сооружений.

В первую очередь, необходимо теоретическое решение проблемы, определения оптимальной структуры системы мониторинга разнородных объектов, размещенных на большой территории.

3.1. Математическая формулировка задачи

Критерием эффективности системы мониторинга может служить достоверность мониторинга объектов олимпийского комплекса, которая определяется показателями методической и инструментальной достоверности.

Вопросы определения инструментальной достоверности регламентированы в нормативно-технической документации и здесь не рассматриваются.

С целью теоретического обоснования облика структуры системы мониторинга проведём сравнительный анализ методической достоверности систем мониторинга с сосредоточенной и рассредоточенной инфраструктурами. Условимся, что система мониторинга позволяет тестировать с заданной точностью величины параметров $X_т$, характеризующих объект наблюдения. При этом выход параметра $X_т$ за пределы верхнего $X_{пв}$ или нижнего $X_{пн}$ значений допусков будем называть его отказом:

$$X_т =$$

$$X_т \leq X_{тв}$$

Количество параметров, $\mathbf{X_П}$, подлежащих тестированию, очевидно, определяет степень сложности системы тестирования и наземного оборудования системы мониторинга.

3.2. Решение задач

$\mathbf{П_{xТ}}$ $\mathbf{M_Т}$

Интенсивность отказов по тестируемым параметрам $\mathbf{X_Т}$ определяет полноту тестирования, которая определяется по формуле:

,

$\mathbf{M_Т}$

где - полнота тестирования,

- интенсивность отказов по тестируемым параметрам $x_Т$;

- интенсивность отказов по общему числу параметров $x_п$;

Введём функцию

$$v(\mu) = lim \quad (1)$$

которая представляет собой плотность распределения интенсивности отказов тестируемых параметров.

Интенсивность $П_Т$ тестируемой аппаратуры в момент t равна:

$$П_Т(t) = \int_0^{\mu(t)} v(\mu) d\mu \quad (2)$$

При малой интенсивности $П_Т$ за бесконечно малый промежуток времени dt в процессе тестирования возможен выход за пределы допусков (отказ) только одного параметра. Этот отказ может произойти либо на тестируемой части аппаратуры, либо на оставшейся (не тестируемой). Тогда вероятность сложного события, заключающегося в том, что в аппаратуре произойдёт отказ во время тестирования, определяется выражением:

$$\beta_2 q_T = B_M(1-\beta_1) + \beta_1 q_T \quad (3)$$

где B_M – методический риск,

β_1, β_2 – условные вероятности необнаруженных отказов параметров в аппаратуре при условии, что отказ произошёл в процессе тестирования;

$q_Т$ – вероятность появления отказа на момент окончания процесса тестирования.

Методический риск B_M в выражении (3) при тестировании определяется по формуле:

$$B_M = q_Т(\beta_2 - \beta_1)(1-\beta_1) \quad (4)$$

В выражении (4) величины $q_Т$, β_1, β_2 могут определяться по статистическим данным.

Для идеальных средств в смысле точности измерений тестирования вероятности необнаруженного отказа, произошедшего до начала тестирования $\beta_2 = 0$. Тогда выражение (4):

$$B_M = \beta_2 q_Т \quad (5)$$

Проанализируем полученные закономерности применительно к базовому варианту НАС на территории Красной Поляны и к варианту с рассредоточенной инфраструктурой, в том числе за пределами Краснодарского края.

Базовый вариант (Красная Поляна)

Получение мониторинговой информации осуществляется за $\Delta t \to 0$.

Плотность $v(\mu)$ с учетом (2) представлена импульсивной δ – функцией:

$$v(\mu) = П_Т\, \delta(\mu - \mu_i) \quad (6)$$

Свойства δ – функции:

$$\left.\begin{array}{c}\delta = 0 \text{ при } \mu \neq \mu_i \\ \delta(\mu - \mu_i) = \infty \text{ при } \mu = \mu_i\end{array}\right\} \qquad (7)$$

где μ - текущее значение полноты тестирования;

μ_i - фиксированное значение полноты тестирования

$$0 \leq \mu_i \leq \mu \ .$$

На основании выражений (2-5) в момент t методический риск заказчика равен:

$$B_м = П_T \int_0^{\mu(t)} dt \int_0^{\mu(t)} \delta(\mu - \mu_i) d\mu = q_T(1 - \bar{t}_i) \qquad (8)$$

где $\bar{t}_i = \frac{t_i}{t}$ - номинированное время.

В конце тестирования по (8) при $\bar{t}_i = 1$ имеем: $B_M = 0$. Это означает, что достоверность тестирования $D_M = 1 - B_M = 1$.

Вариант системы с рассредоточенной инфраструктурой

Параметры целевой аппаратуры тестируются последовательно на рассредоточенных, на больших расстояниях тестовых участках.

Время тестирования каждого параметра одинаково, отказ по тестируемым параметрам равновероятны.

$$v(\mu) = П_T / \mu = const \qquad (9)$$

В этом случае:

$$B_м = \int_0^{\mu(t)} dt \int_0^{\mu(t)} v(\mu)\, d\mu = 0{,}5 \quad П_T \bar{t}_i \mu^2(\bar{t}_i) \qquad (10)$$

В конце тестирования $\bar{t}_i = 1$;

$$B_м = 0{,}5;\ D_м = 1 - 0{,}5 = 0{,}5$$

Откуда следует, что в конце процесса тестирования остаются необнаруженными до половины отказов, возникающих в процессе тестирования. Система с сосредоточенной инфраструктурой реализована при разработке САКМ, выполняющей требования, мониторинга строительства и эксплуатации инфраструктуры Олимпийского комплекса в г. Сочи.

3.3. Обоснование инфраструктуры САКМ и её соответствия техническим требованиям.

Во всех случаях возможность дистанционного зондирования объектов Олимпийского комплекса основана на объективно существующих связях между характеристиками природной среды и полем отражённого и собственного излучения объектов ОК.

Светорассеивающие поверхности так же, как и гладкие поверхности и изотропные среды характеризуются полными коэффициентами отражения и пропускания. Но при этом следует учитывать, что отражённое излучение должно суммироваться по всему полупространству (полусфере) перед освещаемой поверхностью, а пропущенное - по всему полупространству за поверхностью, через которую прошедшее излучение покидает освещённый объект. Полные коэффициенты отражения, пропускания и поглощения зависят не только от спектральных свойств материалов, определяемых функциями $\rho(\lambda)$, $\tau(\lambda)$, $\alpha(\lambda)$, но также от вида функций, характеризующих спектральный состав падающего излучения.

Для описания оптических свойств природного покрова Земли достаточно широко используют коэффициент спектральной яркости (КСЯ). КСЯ – фотометрическая функция, характеризующая структуру рассеянного элементами подстилающей поверхности излучения, как по длинам волн, так и в зависимости от условий освещения и наблюдения. В таком определении функцию КСЯ природных объектов можно описать в следующем виде:

$$\beta_\omega = f(\lambda, i, \varphi, \mathrm{A}, \alpha, \gamma, \ldots) \qquad (11)$$

где ω - телесный угол, в котором измеряются КСЯ; $\lambda -$ длина волны; $i, \varphi -$ углы, определяющие направления падающего и наблюдаемого лучей; $\mathrm{A} -$ разность азимутов между направлением падающего и отражённого луча; $\alpha, \gamma -$ признаки, характеризующие свойства и состояние исследуемых объектов.

Интегральный коэффициент прозрачности, как видно, легко определяется из этого выражения через измеренные значения E при известном значении E_0.

Для максимального учета баланса факторов, воздействующих на окружающую среду, проводят измерения метеорологических параметров, включающих скорость и направление ветра, давление, температуру и относительную влажность воздуха, а также температуру подстилающей поверхности в месте расположения средств калибровки целевой космической аппаратуры.

Исходные характеристики средств калибровки мир в виде контраста в видимой и ближней ИК диапазонах спектра получают по результатам измерения спектральных или интегральных коэффициентов отражения черного и белого полей миры (высокого контраста) или отличающихся по тону серых полей миры (низкого контраста).

Температурный контраст крупногабаритных активных тепловых мир в диапазоне спектра 8-12 мкм определяют с помощью тепловизионных измерений. При этом следует иметь в виду, что в качестве опорных средств калибровки кроме искусственных объектов могут быть использованы естественные объекты, имеющие достаточно большие размеры и однородную в оптическом отношении поверхность.

Систематизация полученных результатов измерений должна быть предусмотрена в согласованной с тематическими задачами космического дистанционного зондирования структуре проблемно-ориентированных банков данных (БД).

Информационными единицами подобных БД являются:

- данные об условиях измерений;
- метрологические и актинометрические данные на момент измерения;
- непосредственные измерения исходных характеристик средств калибровки или тестовых участков подстилающей поверхности.

Сведения об условиях измерений обычно включают:

- дату;
- время;
- географические координаты места наблюдения;
- объект Олимпийского комплекса;
- высоту и направление визирования;
- код прибора и его характеристики;
- размеры реализации;
- пространственное разрешение;
- спектральный диапазон.

Аналогично метеорологическая и актинометрическая информация должна содержать:

- метеорологическую оптическую дальность;
- составляющие радиационного баланса;
- составляющие теплового баланса;
- естественную горизонтальную энергетическую и световую освещенность;
- давление, относительную влажность и температуру воздуха;
- скорость и направление ветра;
- форму и количество облачности;
- температуру подстилающей поверхности;
- описание постилающей поверхности вокруг средств калибровки.

Сведение о непосредственных измерениях характеристик средств калибровки или тестовых участков подстилающей поверхности включают:

- геометрические характеристики;
- расположение относительно сторон света;
- спектральные коэффициенты отражения;
- результаты расчета по данным измерений.

При решении тематических задач ДЗ в каждом конкретном случае определяют свою совокупность полигонных измерений и состав измерительной аппаратуры.

3.4. Разработка структуры системы мониторинга

САКМ состоит из 4-х кластеров, выполняющих следующие функции:

мониторинг строительства и эксплуатации объектов инфраструктуры ОК, осуществляемый путем проведения аэро - фото и тепловизионных съемок;

обработку поступающей мониторинговой информации, анализ и прогнозирование динамики состояния объектов инфраструктуры олимпийского комплекса в течение заданного периода времени;

выявление по полученной информации явных и скрытых опасных явлений природного и технического характера;

представление в удобной форме и выдача Наблюдательному совету, а также Администрации олимпийского комитета информации для объективного контроля за ходом строительства и эксплуатации объектов инфраструктуры Олимпийского комплекса в реальном масштабе времени для принятия своевременных решений.

Для достижения этих целей и служит САКМ, решающая поставленные задачи при проведении мониторинга строительства и эксплуатации инфраструктуры Олимпийского комплекса в г. Сочи.

Основными структурами составляющими САКМ являются наземный, авиационный и космический сегменты.

В данной работе рассматриваются 2 варианта САКМ: с сосредоточенной и рассредоточенной инфраструктурой.

Наземный сегмент САКМ

Базирование технических средств наземного сегмента осуществляется на стационарном аэродроме, оснащенном всеми средствами обеспечения и технического обслуживания авиационной техники, а также лабораторией по обработке информации мониторинга.

При выборе аэродрома Крыма и Кавказа оценивалась надежность и стоимость базирования.

Авиационный сегмент САКМ

Технические средства авиационного сегмента обеспечивают получение детальной фото и видео-информации о состоянии и динамике изменения характерных признаков на выбранных участках контролируемой поверхности в районе строительства и эксплуатации инфраструктурных объектов и инженерно-технических сооружений Олимпийского комплекса (Таблица 1).

Космический сегмент САКМ

Космический сегмент получает информацию от космических аппаратов типа «Ресурс-ДК», которая использовалась для обеспечения безопасности дорожного движения в условиях горной местности. Может также закупаться космическая информация самая различная по качеству: разрешению на местности, радиометрическим, геометрическим и другим характеристикам.

4. Результаты общих оценок эффективности применения САКМ для мониторинга г. Сочи и Краснодарского края при строительстве и эксплуатации ОК.

Комплексное использование САКМ позволяет Администрации ГК ОС и Наблюдательному совету осуществлять объективный контроль за ходом строительства инфраструктуры ОК. САКМ является инструментом оперативного контроля, что позволяет решать задачи по предупреждению органов исполнительной власти и населения Азово - Черноморского региона об опасных техногенных, погодных и экологических явлениях, в том числе обеспечивать необходимой информацией судовые системы безопасного плавания в местах образования локальных штормовых условий.

САКМ обеспечивает:

- снижение ущерба от опасных погодных условий в 3-5 раз благодаря точным и своевременным прогнозам, получаемым от САКМ (наводнения, ливни, смерчи, засуха, оползни, сели, обледенения проводов).
- контроль и диагностику защитных сооружений на море от разрушения пляжей берегов.

Заключение

На предыдущей конференции было принято решение о представлении оценок показателей эффективности рассматриваемых роботов. Отмечалось, что без таких оценок не представляется возможным сравнения и объективный выбор наилучшего варианта для практической реализации. Поскольку не было представлено ни одного доклада с методикой оценки показателей эффективности спроектированных роботов, то данная работа может восполнить указанный пробел и явиться исполнением решении предыдущей конференции.

1. Я.П. Гришко, А.А. Чуйко, Г.С. Новиков. Применение подсистем искусственного интеллекта искусственного зрения в системе космического мониторинга объектов Олимпийского комплекса в г. Сочи. // Международная научная конференция. «Искусственный интеллект. Интеллектуальные системы. ИИ-2010г. пос. Кацивели, АРК Крым Украина.
2. Я.П. Гришко, А.А. Чуйко, Г.С. Новиков. Применение мобильного авиационного комплекса в Системе космического мониторинга Олимпийских объектов при строительстве и эксплуатации в г. Сочи 2014г.// Научная конференция г. Москва.
3. Я.П. Гришко, А.А. Чуйко, Г.С. Новиков. Самообучающая система неконтактного контроля и диагностирования технического состояния Летательных аппаратов // Международная научная конференция. «Искусственный интеллект. Интеллектуальные системы. ИИ 2012г.» пос. Кацивели, АРК Крым Украина.
4. Я.П. Гришко, А.А. Чуйко, Г.С. Новиков.
5. Разработка метода управления лазерным сканированием объектов с целью их неконтактной идентификации и диагностирования. // Международная научная конференция. «Искусственный интеллект. Интеллектуальные системы. ИИ 2013г.» пос. Кацивели, АРК Крым Украина.

S. Sinitca, S. Sechenev, I. Ryadchikov, Yu. Mamelin

DEVELOPING A MODEL OF COMBAT ROBOT SYSTEM TO PARTICIPATE IN ROBOTICS COMPETITIONS

Kuban State University, Krasnodar, Russia

С.Г. Синица, С.И. Сеченев, И.В. Рядчиков, Ю.В. Мамелин

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ БОЕВОЙ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ УЧАСТИЯ В РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СОРЕВНОВАНИЯХ

ФГБОУ ВПО «КубГУ», г. Краснодар

Боевая робототехническая система (далее - БРТС) - устройство, заменяющее человека в боевых ситуациях для сохранения человеческой жизни или для работы в условиях, несовместимых с возможностями человека, в военных целях:разведка, боевые действия, разминирование и т. п.

Основные функциональные модули БРТС:

1. Надежная конструкция, отвечающая нормам по проходимости.
2. Мощный контроллер, позволяющий роботу проводить вычисления для автономного решения задач.
3. Системы датчиков и камер для сбора информации.
4. Канал передачи данных и управления.
5. Устройства взаимодействия с окружающим миром, в т.ч. и оружие.

Для конструирования БРТС команда инженеров и программистов должна не только обладать разнообразными квалификациями, но и иметь практический опыт реализации достаточно сложных конструкций. Такой опыт можно приобрести с помощью решения модельных задач прикладной робототехники, которые часто возникают на соревнованиях.

В данной статье пойдет речь о построении робототехнической системы, удовлетворяющей всем признакам БРТС, для участия в студенческой категории сревнований “Охота”**.**

Суть соревнования

Студенческая категория соревнований “Охота” была впервые представлена на финальном этапе Всероссийской Робототехнической Олимпиады в июне 2015 года.

Основные особенности соревнования:

1. Старт в точке, называемой “базовым лагерем”, обозначен зеленым квадратом на рисунке 1. За финиш в данной точке начисляются дополнительные очки.

2. Необходимо поразить хотя бы одну из трех движущихся мишеней. Скорость каждой случайна, направление движения объявляется перед попыткой. Овалы, по которым движутся мишени, обозначены буквами М на рисунке 1.

3. Попадание засчитывается, только если робот стреляет, находясь при этом на специально обозначенных участках трассы, называемых “рубежами”. За попадание с дальнего рубежа начисляется в три раза больше очков, чем за попадание с ближнего.

4. Робот должен быть собран на базе контроллеров NXT/EV3/VEX/ТРИК.

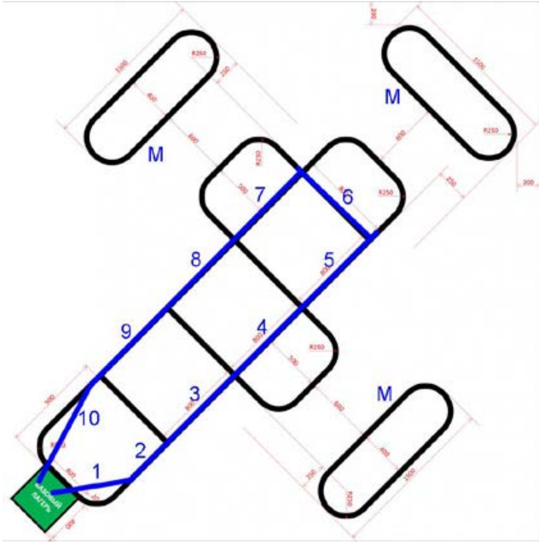


Рис. 1. Поле для соревнования

Таким образом, данная техническая задача отвечает требованиям для модельной задачи для получения навыков проектрования и программирования автономных устройств, способных выполнять реальные боевые задачи.

Описание конструкции робота

Основные конструктивные особенности, отражающие также функциональные модули БРТС в общем случае:

1. Рамная конструкция, в данном случае из алюминиевого профиля.
2. Многофункциональный бортовой вычислитель с обеспечением функционирования системы технического зрения - контроллер “Трик”.
3. Система ведения огня - три пусковые установки, работающие по принципу арбалета, материал накапливающий энергию – резина.
4. Независимый привод на каждое заднее колесо, подключение оптических энкодеров 15000 отсчетов на оборот, редукторы 360:1, два передних всенаправленных колеса с независимым вращением.
5. Набор из 5 оптических датчиков спереди для определения характера подстилающей поверхности - в данном случае, разметки полигона.
6. Видеоподсистема, состоящая из видеокамеры OV-7670 и цифрового сигнального процессора C674x Fixed/Floating-Point VLIW DSP для распознавания целей.

В качестве бортового вычислителя для устройства был выбран робототехнический контроллер “Трик”, разработанный российскими инженерами из ООО “КиберТех”. Кибернетический контроллер предназначен для управления роботами, беспилотными летательными аппаратами, средствами передвижения (включая балансирующие «сегвеи»), встраиваемыми устройствами и киберфизическими системами. Контроллер совместим с широким спектром периферийных устройств, имеет в своем составе все необходимое оборудование для управления двигателями постоянного тока и сервоприводами, а также для приема и обработки информации от цифровых и аналоговых датчиков, микрофонов, видеосенсоров. Контроллер снабжён цветным сенсорным дисплеем, программируемыми кнопками, WiFi и Bluetooth, имеет встроенную защиту от перегрузки по току и от глубокой разрядки аккумулятора.

Ядром контроллера является процессор OMAP-L138 C6-Integra™ DSP+ARM® SoC от TexasInstruments, который позволяет общеуправляющую часть управляющего алгоритма реализовать на ARM-сопроцессоре (ARM926EJ-S™ RISC MPU 375 МГц), а распознавание с камеры - на DSP (C674x Fixed/Floating-Point VLIW DSP).

Другие характеристики контроллера:

1. 4 порта двигателей 6-12V DC, с индивидуальной аппаратной защитой от перегрузки по току (до 2А на двигатель).
2. 19 сигнальных портов общего назначения (6 одноканальных и 13 двухканальных) с питанием 3.3-5V, из них 6 могут работать в режиме аналогового входа.
3. 2 входа BT.656 VGA 640*480, поддержка режима стерео.
4. 3-х осевой акселерометр, 3-х осевой гироскоп, аудиокодек, усилитель, конвертеры и схемы управления питанием, схемы защиты входов от перегрузок по напряжению и току.

5. На центральном ARM-процессоре контроллера ТРИК работает Linux, моторы и датчики программно доступны даже из shell скриптов. Поэтому автономные модели можно программировать не только на C или C++/Qt, но и на JavaScript, C#/F# (.NET), Python и Java.

Одной из задач, которые стояли при конструировании автономного робота-"охотника", это создание пускового устройства для стрельбы по движущимся мишеням. Для удачной "охоты" пусковой устройство должно стрелять по мишеням с большой скоростью, высокой точностью, максимально кучно и по настильной траектории.

Для достижения данной задачи была сконструирована система из трёх пусковых установок. Каждая установка состоит из трех основных частей: направляющих, системы накопления энергии и сложного спускового механизма.

Направляющие – это основная часть установки, которая предназначена для метания снаряда с определённой скоростью. Они придаёт снаряду устойчивость полёта в нужном направлении. В рамках регламента соревнований было рассчитана оптимальная длина ствола, которая должна составлять не менее чем ¾ от максимально допустимой длины робота, а его диаметр – 680 мм, что всего на 2 мм превышает диаметр снаряда. Соблюдение этих условий позволяет повысить точность попаданий за счет минимального люфта при движении снаряда в стволе и повысить скорость его разгона.

Спусковой механизм включает в свою конструкцию систему рычагов и спусковой ролик (Рис. 2).

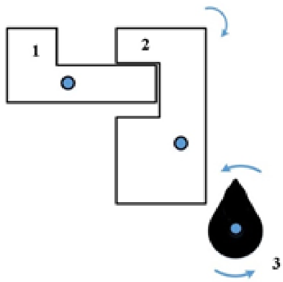
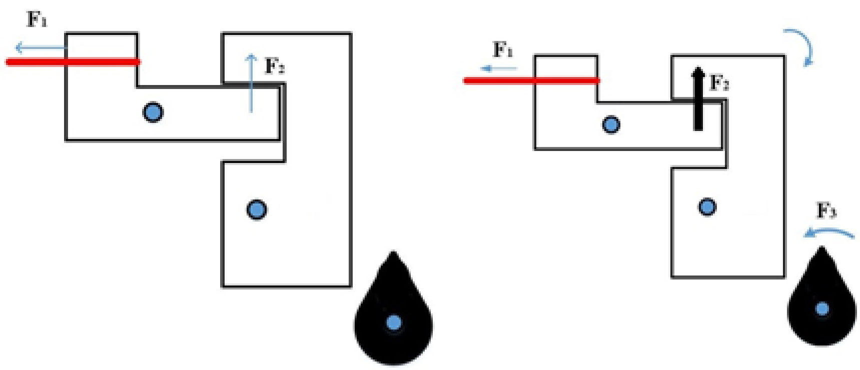


Рис. 2. Схема спускового механизма

где: 1 - орех, 2 - шептало, 3 - спусковой эксцентрик

Спусковые эксцентрики объединены общей спусковой осью и расположены на ней так, что шиповидный выступ ролика на второй и третьей "ружье" относительно первого смещены на 120 и 240 градусов соответственно. Это позволяет производить три последовательных выстрела по одному из каждой пусковой, задействуя единственный привод. Поворот общей спусковой оси осуществляется сервомотором.

Конструктивная особенность данного механизма заключается в том, что вся сила F_1 (Рис. 2(а)), которой обладает система натяжения во взведенном положении, приходится на первый рычаг и полностью блокируется вторым, высвобождение, которой происходит посредством малого воздействия на плечо второго рычага. Это приводит к моментальному выстрелу снаряда из "ружья".



а) б)

Рис. 3. Состояние спускового механизма во время движения

где: а – положение элементов спускового механизма во время движения; б – положение элементов спускового механизма в момент выстрела

Стоит отметить, что всё остальное время движения "охотника" по траектории нагрузки на сервомотор нет, что позволяет избежать произвольных выстрелов, уменьшить потребление тока и напряжения, повысить эффективность стрельбы.

Для данной конструкции были выбраны моторы с встроенными энкодерами. Энкодеры применяются для быстродействующей обратной связи по углу поворота колеса. В данных соревнованиях точность обратной связи по координате играла не маловажную роль так как одним из условий была парковка робота по возвращении на базу. По энкодерам рассчитывались координата БРТС, что в итоге давало успешную парковку. Существует несколько видов энкодеров:

В нашем случае оптимально было использование моторов с инкрементальными квадратурными оптическими энкодерами, особенностями использования которых являются:

1. Контроль углового положения,
2. Измерение скорости вала, его положения или смещения,
3. Контроль позиционирования.

В передней части робота установлены свободновращающееся всенаправленные колеса - омниколеса, а основными ведущими являются обычные колеса, расположенные сзади. В силу конструкции омниколеса являются всенаправленными и облегчают вхождение БРТС в повороты, так как боковая сила трения, в данном случае, становится силой трения качения, а не скольжения. Всенаправленность конструкции таких колес достигается путем встроенных роликов по всей длине окружности. Большие, основные колёса, расположенные в задней части робота, толкают робота в нужном направлении, а маленькие омниколеса сами подстраиваются под движение «охотника». Эти колеса не нуждаются в дополнительном программировании, моторах или прочем контроле, а едут за счет общей инертности робота.

Для распознавания трассы на передней части робота установлены 5 оптоэлектронных датчиков, датчики с номерами 1 и 5 по краям конструкции, датчики с номерами 2-4 - в центре с учетом ширины линии.

Описание алгоритма

Робот передвигается по полю по минимальной траектории, проходящей через все дальние рубежи, против часовой стрелки, т.к. все пусковые установки направлены вправо по ходу движения. Траектория движения обозначена синим цветом на рисунке 1.

Алгоритм проезда трассы разбит на 10 состояний (Рис. 1), основные классы состояний:

1. Проезд по линии без стрельбы (состояния 3,5,8,9);
2. Прицеливание и стрельба (состояния 4,6,7);
3. Маневры: парковка, повороты на 90 градусов (состояния 1,10, переходы между состояниями 5,6 и 6,7).

Вычислительная мощность контроллера обеспечивает около 40 итераций рабочего цикла в секунду с выключенным распознаванием с камеры и около 20 итераций в секунду с включенным, что является достаточным для данных условий и конструкции робота.

В начале рабочего цикла программа получает показания датчиков 1-5 и переводит цифры с сенсоров в зависимости от калибровки в значения белого или черного цвета.

Основные функциональные модули программы:

1. Езда по линии. Используются показания датчиков 2-4. Для определения значений мощности, которые нужно подавать на двигатели, был выбран ПИД-регулятор (пропорционально-интегрально-дифференциальный). Значение ошибки устанавнивается равным нулю, когда датчик №3 показывает черный цвет, датчики №4 и 5 - белый. Коэффициенты регулятора были подобраны экспериментальным путем. Для повышения устойчивости интегральная составляющая обнуляется по достижении идеального положения.

2. Определение перекрестков. Используются показания датчиков 1 и 5, расположенных в стороне от линии, что исключает возможность их срабатывания не на перекрестках. Также при распознавании перекрестка робот какое-то время едет вперед, чтобы точно проехать перекресток и чтобы датчик не сработал в следующей итерации рабочего цикла.

3. Распознавание цели и стрельба. Модуль распознавания цели работает непрерывно как отдельный linux-демон, но для увеличения производительности показания с него считываются только в тех состояниях, когда необходимо. Мишень определяется с большой точностью алгоритмом распознавания объекта по цветовому диапазону Управляющая программа получает 2 параметра: размер “цели” и горизонтальную координату относительно центра кадра. Размер позволяет однозначно определить, на ближнем или дальнем от робота участке траектории находится “мышь”, горизонтальная координата позволяет выстрелить с упреждением. Калибробка датчика происходит один раз для каждого робота.

4. Жестко заданные маневры (повороты на 90 градусов, парковка, выезд с парковки). Для точного позиционирования используются показания энкодеров двигателей.

Заключение

В данной статье было описано решение задачи построения модели боевой робототехнической системы, обоснован выбор категории соревнований "Охота" как предлагающей к участию устройства, удовлетворяющие всем основным критериям БРТС. Было дано описание программной и аппаратной части построенного робота и обоснование использования тех или иных технических решений. Разработанная БРТС заняла первое место во Всероссийской робототехнической олимпиаде.

1. Студенческая категория "Охота": http://robolymp.ru/rules-and-regulations/okhota/
2. Робототехнический конструктор "Трик": http://www.trikset.com/
3. Боевая робототехника: https://ru.wikipedia.org/wiki/Боевой_робот
4. Видео победной попытки БРТС http://vk.com/video251478391_171657163

A. Korsakov, V. Milov

COMPREHENSIVE STATISTICAL PROCESSING OF TELEVISION DATA IN THE ANALYSIS OF SPORTS COMPETITION

RTC, Saint-Petersburg, Russia
korsakov@rtc.ru

А.М. Корсаков, В.С. Милов

КОМПЛЕКСНАЯ СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ТЕЛЕВИЗИОННЫХ ДАННЫХ ПРИ АНАЛИЗЕ СПОРТИВНЫХ СОРЕВНОВАНИЙ

ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург
korsakov@rtc.ru

Система предназначена для комплексной статистической обработки информации о движущихся объектах на наблюдаемой сцене. Разработка программы проводилась на основе реальных данных, полученных в ходе телетрансляций футбольных и хоккейных матчей, но может быть адаптирована для любых видов спорта. Результаты работы приведены в данной статье.

Текущая версия программы способна предоставлять следующую информацию:

– Средняя скорость игрока за время нахождения его на поле;
– Максимальная скорость игрока за время нахождения его на поле;
– Общая дистанция, пройденная игроком за время нахождения его на поле;
– Время нахождения игрока на поле;
– Дистанция и скорость игрока за определённое, заданное оператором, время;
– Качественная и количественная оценка частоты нахождения игрока на различных участках поля;
– Расстояние от произвольной точки на поле до ворот;
– Расстояние между двумя произвольными точками.

Программа устойчива к большинству помех на наблюдаемой сцене, таким как: изменение освещённости (тучи, включение/выключение освещения), вибрации камеры, аппаратные шумы, атмосферные осадки и т.п. В отличие от других аналогичных систем, представляемая система способна работать с использованием лишь одной видеокамеры, но предусмотрена возможность работы и с большим числом камер, что улучшает качество работы системы, но уменьшает её производительность. Существенными требованиями к видеокамерам являются их стационарность (неподвижность) и охват видеокамерами всей зоны интереса (всего поля).

Работа программы осуществляется в полуавтоматическом режиме.

Загрузка оператора тем выше, чем больше число отслеживаемых объектов (игроков) и чем сложнее их поведение в плане пересечений и взаимодействия друг с другом.

Система способна работать как с видеокамерами(-ой) (в режиме он-лайн), так и с заранее записанными видеороликами с возможностью их детального анализа. Интерфейс программы удобен для управления, все основные операции производятся в одном окне при помощи щелчка мыши.

Предлагаемые варианты применения:

Телевидение:

Работа в прямом эфире для он-лайн получения статистической информации (пройденная игроком дистанция, максимальная и средняя скорость, скорость контратаки, расстояние до ворот при штрафном ударе и т.п.);

Послематчевый анализ (детальный разбор действий игроков в различных эпизодах: расстояния, скорости, нахождение игроков на определённых участках поля);

Тренировочный процесс: измерение скоростных и дистанционных показателей игроков. Программа формирует полный отчёт для тренера (пользователя) по всем скоростным и дистанционным показателям игроков.

Программа требует предварительных настроек, которые задаются после запуска программы, либо загружаются из ранее сохранённых файлов.

После выбора источника видеоинформации система требует настройки параметров поля (зона интереса, метрические размеры поля, точки привязки видеокамер и т.п.) и задания информации по командам и их отдельным игрокам. Эти данные могут быть загружены из ранее сохранённых файлов. Операция предварительной настройки программы выполняется однократно в начале работы программы. На Рис. 2 и 3 показаны окна настройки параметров поля и задания информации по игрокам соответственно.

При работе с одной видеокамерой на современных компьютерах программа функционирует в режиме реального времени. Тем не менее, при недостатке быстродействия система позволяет работать в режиме пониженной частоты обработки входной информации (на Рис. 4 параметр FPS), что повышает быстродействие системы, но может привести к потере в качестве обработки информации. Кроме того, предусмотрена возможность понижения входного разрешения (на Рис. 4 параметр ReduceLevel) с целью увеличения быстродействия системы, что также приводит к ухудшению качества работы. Ухудшение качества работы в обоих случаях не является критичным, что позволяет использовать систему на компьютерах со слабой производительностью (или, в перспективе, на одном компьютере с несколькими независимыми каналами получения видеоинформации), но всё же рекомендуемым режимом работы являются параметры, обеспечивающие максимальное качество обработки видеоданных.

Кроме того, дополнительным параметром системы является порог бинаризации (на Рис. 4 параметр BinarizationThr). Данный параметр влияет на чувствительность системы при обнаружении объектов (игроков) и позволяет отсекать ложные срабатывания, либо более уверенно отслеживать объекты при низкой контрастности. Данный порог является адаптивным (т.е. самонастраивающимся), тем не менее, его корректировка может быть полезна на начальной стадии работы программы.

Во время работы программы существует возможность получать он-лайн информацию о метрическом расстоянии от заданной точки на сцене до ворот, либо о расстоянии между двумя произвольно выбранными точками. Для решения первой задачи при настройке параметров поля задаются точки центров ворот команд.

Задание (либо переназначение) игрока осуществляется при помощи панели задания игроков (Рис. 1) в режиме реального времени.

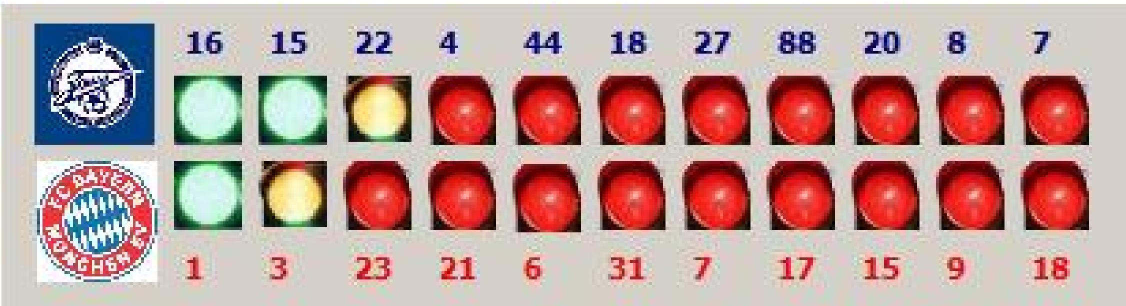


Рис. 1. Панель задания игроков

На Рис. 1 красным индикатором обозначаются незаданные либо потерянные игроки, жёлтый цвет индикатора соответствует задаваемому игроку, зелёный цвет индикатора отражает игроков, по которым производится расчёт статистической информации.

Для задания отдельного игрока оператор щёлкает мышью по индикатору соответствующего игрока. В случае щелчка по красному индикатору включается режим задания игрока, в случае щелчка по зелёному индикатору включается режим переназначения игрока.

После активации режима задания (переназначения) игрока оператор щёлкает мышью в окне видеовывода по соответствующей данному игроку области движения, которая обозначается красной рамкой. Заданный игрок начинает выделяться цветной рамкой. Цвет рамки закреплён индивидуально за каждым отдельным игроком и не изменяется за всё время работы системы. Игроки первой команды выделяются в спектре цветов от бирюзового до фиолетового, игроки второй команды – от оранжевого до светло-зеленого (Рис. 2). Красной рамкой выделяются незаданные либо потерянные игроки, зелёной рамкой – игроки, находящиеся под персональным наблюдением (см. следующий параграф).

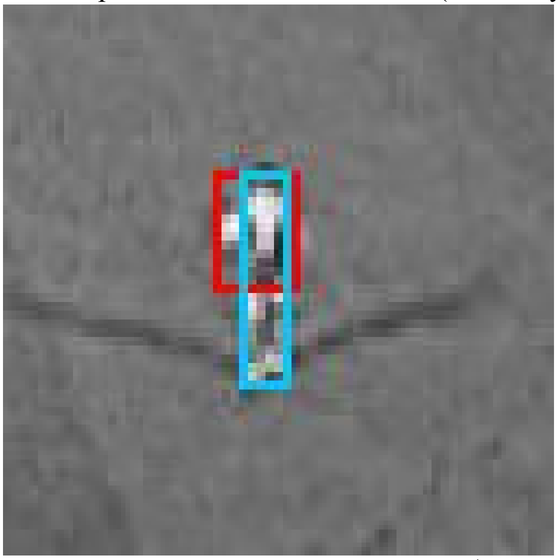


Рис. 2. Выделение игрока рамкой в момент его захвата (игрок №2 команды №1)

При двойном клике по номеру игрока на панели задания игроков (Рис. 1) происходит замена игрока.

Пример задания игроков приведён на Рис. 3:

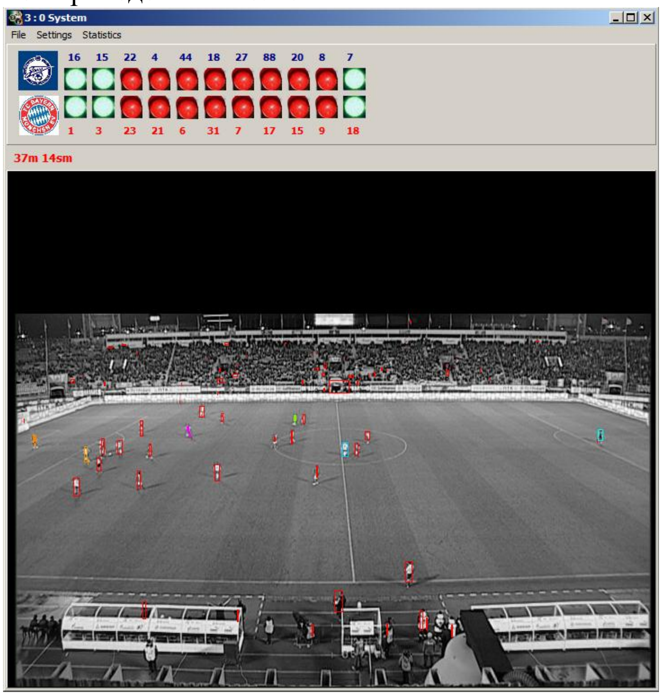


Рис. 3. Пример задания игроков: светло-оранжевая рамка – вратарь команды №1, светло-зелёная рамка– защитник команды №1, темно-оранжевая рамка – нападающий команды №1, бирюзовая рамка – вратарь команды №2, светло-голубая рамка – защитник команды №2, фиолетовая рамка – нападающий команды №2

При щелчке мышью по номеру отдельного игрока на панели задания игроков (Рис. 1) включается режим персонального наблюдения за данным игроком. Допускается возможность одновременного отслеживания произвольного количества игроков. Включение режима слежения за отдельным игроком позволяет получать следующую информацию по данному игроку:

- Текущая скорость игрока во время наблюдения;
- Средняя скорость игрока за наблюдаемый период времени;
- Максимальная скорость игрока за наблюдаемый период времени;

• Пройденная дистанция игрока за наблюдаемый период времени;
• Время слежения за игроком.

Данный режим особенно актуален в таких ситуациях как оценка скорости и пройденного расстояния отдельным игроком в процессе контратаки, либо оценка скорости и пройденной дистанции игроком при некоторых упражнениях во время тренировочного процесса.

Иллюстрация режима слежения за отдельными игроками приведена на Рис. 4.

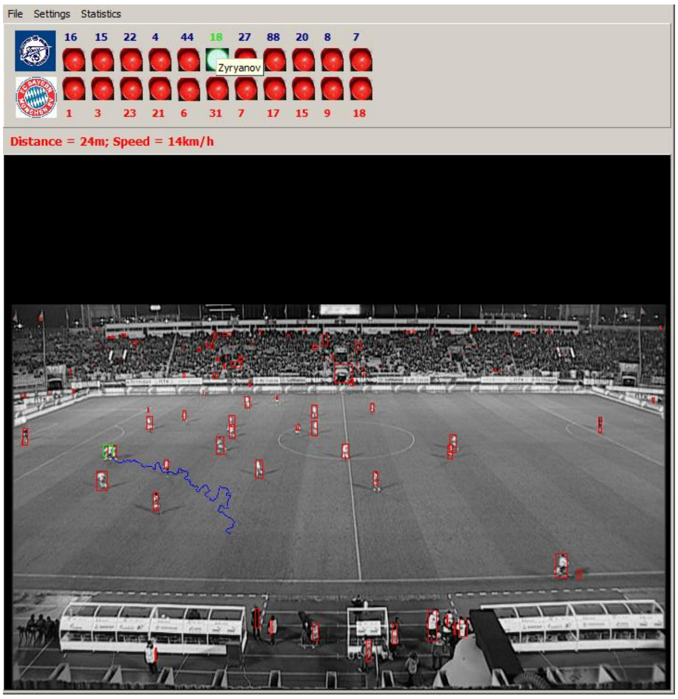


Рис. 4. Режим слежения за отдельным игроком. Синими точками обозначена траектория игрока, зелёной рамкой – отслеживаемый игрок, над окном видеовывода: дистанция (24 метра) и скорость (14 км/ч) игрока за время наблюдения

Конечным результатом работы программы является таблица с основными статистическими показателями игроков за заданный промежуток времени. Окно результатов может быть выведено в любой момент работы программы (Рис. 5).

3 : 0 System - Results

Zenit
Saint-Petersburg
Russia

№	Name	Distance	Max Speed	Avg Speed	Time
16	Malafeev	11	6,34	2,73	0m 21s
15	Shirokov	130	6,66	3,2	2m 29s
22	Anyukov	193	8,06	4,83	2m 27s
4	Krizanac	33	6,56	4,63	0m 25s
44	Tymoshchuk	105	11,08	7,36	0m 58s
18	Zyryanov	104	5,09	4,26	1m 31s
27	Denisov	15	4,58	4,58	0m 21s
88	Gorshkov	52	7,64	7,29	0m 30s
20	Fayzukin	13	3,97	3,97	0m 17s
8	Pogrebnyak	38	6,3	5,71	0m 29s
7	Dominges	89	6,4	5,42	0m 59s

Bayern
Munchen
Germany

№	Name	Distance	Max Speed	Avg Speed	Time
1	Kahn	44	16,12	3,51	0m 52s
3	Lucio	14	6,03	6,03	0m 8s
23	Jansen	68	8,9	6,5	0m 38s
21	Lahm	69	9,57	6,42	1m 32s
6	Demichelis	62	7,77	5,75	0m 59s
31	Schweinsteiger	3	8,25	8,25	0m 5s
7	Ribery	40	2,96	2,06	1m 13s
17	van Bommel	37	2,96	2,66	0m 53s
15	Ze Roberto	81	7,08	3,51	1m 26s
9	Tony	27	5,29	5,29	0m 20s
18	Klose	106	7,29	5,99	1m 8s

Рис. 5. Результат работы программы

В приведённом примере игроки задавались последовательно в процессе работы программы, что объясняет разное время нахождения на поле для отдельных игроков в приведённой таблице. В штатном режиме захват игроков должен производиться заранее (до начала матча). Запуск расчёта статистики производится выбором соответствующего пункта в главном меню (так же как и остановка расчёта статистики) одновременно с началом матча (тайма) (или с его окончанием для остановки расчёта).

В процессе работы программы производится автоматическое сохранение всех заданных и рассчитанных данных. Таким образом, при возникновении экстраординарных ситуаций при работе с программой (например, отключение компьютера от питания и т.п.) имеется возможность загрузить параметры программы на момент сбоя с минимальной потерей данных.

Технические возможности и требования к системе

– Система имеет возможность работы с использованием от одной до трёх видеокамер, наличие специальных телекамер не требуется;
– При работе необходимо обеспечить стационарность камер(-ы) и охват всей зоны интереса;
– Система функционирует в полуавтоматическом режиме, что подразумевает участие оператора;
– Система имеет возможность работы с видеороликами (avi-файлами), что позволяет совершать детальный анализ результатов матча в режиме off-line;
– Система работает в режиме реального времени (25 FPS);
– Программный код реализован с возможностью добавления новых функциональных возможностей системы.

Резюме

Система начала разрабатываться в октябре 2008 года. С тех пор программа претерпела значительные изменения как в алгоритмике, так и в плане пользовательского интерфейса. В настоящее время программа представляет собой удобную в управлении среду получения статистической информации о находящихся на сцене объектах.

Система прошла испытания на ряде официальных спортивных соревнованиях (чемпионат России по футболу, КХЛ, и т.д.).

При разработке программы использовались уникальные алгоритмы работы с изображениями.

G. Kireeva

INTRAPERITONEAL CHEMOPERFUSION TREATMENT OF ADVANCED OVARIAN CANCER IN EXPERIMENTAL SETTINGS USING MECHATRONIC PERISTALTIC PUMP

Scientific research institute of oncology of N. N. Petrov;
RTC, Saint-Petersburg, Russia
galinakireyeva@mail.ru

Г.С. Киреева

ВНУТРИБРЮШИННОЕ ХИМИОПЕРФУЗИОННОЕ ЛЕЧЕНИЕ ДИССЕМИНИРОВАННОГО РАКА ЯИЧНИКА В ЭКСПЕРИМЕНТЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕХАТРОННОГО ПЕРФУЗИОННОГО НАСОСА

НИИ онкологии им. Н.Н. Петрова; ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург
galinakireyeva@mail.ru

Рак яичника (РЯ) является седьмой по частоте причиной смерти женщин от всех видов рака. Бессимптомное течение заболевания на ранних стадиях является причиной того, что более чем в 60% случаев РЯ определяется в далеко зашедших стадиях, характеризующихся наличием перитонеального карциноматоза и опухолевого асцита. Стандартным подходом в лечении диссеминированного РЯ является комбинирование циторедуктивной операции с последующей системной химиотерапией. Однако результаты лечения пациенток с распространенным РЯ остаются неудовлетворительными. Поскольку для РЯ в большинстве случаев характерно распространение в пределах брюшной полости, внутрибрюшинное (в/б) введение противоопухолевых препаратов при данной локализации рака может быть высокоэффективной лечебной процедурой.

Внутрибрюшинная химиоперфузия – высокотехологичный вариант интраперитонеальной химиотерапии, заключающийся в подведении и пропускании раствора цитостатика в течение ограниченного времени через брюшную полость. Технология имеет ряд преимуществ и рассматривается как перспективный способ лечения пациенток с диссеминированным раком яичника. Однако результаты клинических исследований неоднородны и противоречивы из-за того, что нет универсальных режимов и техники выполнения химиоперфузии, отсутствуют данные о том, какие препараты предпочтительно использовать, до сих пор остается открытым вопрос о рациональности сочетания перфузии с гипертермией. Некоторые из этих вопросов могут быть решены в условиях доклинических исследований в максимально короткие сроки.

Целью исследования являлась разработка новых более эффективных и безопасных методов в/б химиоперфузионного лечения перитонеального карциноматоза на модели диссеминированного РЯ у крыс.

В соответствии с целью были сформулированы следующие задачи: апробировать модель диссеминированного РЯ у крыс для химиоперфузионного лечения; разработать экспериментальную установку и технологию нормо- и гипертермической химиоперфузии на модели диссеминированного РЯ у крыс и сформулировать оптимальные режимы НИПХ и ГИПХ; изучить и сравнить безопасность и противоопухолевые эффекты нормотермической интраперитонеальной химиоперфузии (НИПХ) и гипертермической интраперитонеальной химиоперфузии (ГИПХ) с отечественным противоопухолевым препаратом диоксадэтом и цисплатином; исследовать динамику изменения концентрации цисплатина в перфузате и плазме крови крыс с диссеминированным РЯ во время выполнения ГИПХ; изучить и сравнить изменения количества лейкоцитов в периферической крови крыс с диссеминированным РЯ после в/б введения диоксадэта и после ГИПХ с диоксадэтом.

Исследование проведено на 292 крысах самках Вистар, полученных из разводки питомника "Рапполово" РАМН. Для эксперимента отбирались крысы в возрасте 2,5−3 месяца с массой тела 200–270 г. Использован штамм опухоли яичника (ОЯ), полученный из РОНЦ им. Н.Н. Блохина РАМН. При проведении эксперимента штамм ОЯ постоянно перевивали в/б нескольким крысам. Каждой крысе в/б вводилось разведение асцитической жидкости в физиологическом растворе, содержащее 1×10^7 опухолевых клеток. Подсчет опухолевых клеток проводили в камере Горяева. Для характеристики разработанной модели перитонеального карциноматоза ОЯ перевивалась 15 крысам.

Для выполнения в/б перфузий была впервые создана экспериментальная техническая установка, которая состояла из: мехатронного перфузионного перистальтического насоса «Марс» (ЦНИИ РТК), бани термостатирующей, перфузионных магистралей, универсального кибернетического комплекса регистрации и анализа параметров витальных функций «Телец» (ЦНИИ РТК). Также при проведении перфузий были использованы электрическая грелка, цифровые термометры. Для разработки технологии в/б химиоперфузии было использовано 40 крыс с перевиваемой ОЯ.

В качестве лекарственных препаратов были использованы диоксадэт и цисплатин. Отечественный противоопухолевый препарат диоксадэт был разработан в НИИ онкологии им. Н.Н. Петрова, ранее препарат прошел доклинические и клинические исследования и был разрешен для медицинского использования. По результатам ранее проведенных исследований диоксадэт обладает контактным противоопухолевым действием, однако его основным дозолимитирующим побочным эффектом является гематотоксичность. Цисплатин – препарат выбора у пациентов с РЯ и наиболее часто используется в химиоперфузионном лечении РЯ – был выбран в качестве препарата сравнения.

Для решения поставленных задач были выбраны следующие методы исследования: цитологическое исследование мазков асцитической жидкости и гистологическое изучение карциноматозных узлов (для характеристики полученной модели ОЯ). Для анализа безопасности и эффективности химиоперфузионного лечения крысы с перевитой ОЯ рандомизировались на 9 групп и через 48 часов у крыс в группах проводилось соответствующее лечение: в/б введение физ. р-ра (в контрольной группе), однократное инъекционное в/б введение цисплатина и диоксадэта в максимально переносимых дозах, нормо- или гипертермические интраперитонеальные химиоперфузии с цисплатином и диоксадэтом в максимально переносимых дозах. Во время перфузий у крыс контролировались температура брюшной полости в месте притока перфузата, ректальная температура, частота дыхания, частота сердечных сокращений (ЧСС), регистрировалась электрокардиограмма (ЭКГ). На протяжении 10 дней после перфузии крысы подвергались ежедневному взвешиванию. День перевивки был принят за нулевой, первичной конечной точкой исследования была выживаемость. Время наблюдения за животными составляло 90 дней; по окончании эксперимента у всех животных выполнялась аутопсия.

Дополнительно для изучения фармакокинетики цисплатина во время перфузии у 4-х крыс с ОЯ была выполнена ГИПХ. На 10-й, 20-й, 30-й и 40-й минутах от начала перфузии проводился забор образцов перфузата и периферической крови. Количественное определение цисплатина в пробах выполняли методом масс-спектрометрии, тогда как обычно для этой цели используется более длительный и технически сложный метод ВЭЖХ-масс-спектрометрии. Наконец, в следующей серии эксперимента для сравнительного изучения миелотоксичности ГИПХ с диоксадэтом ОЯ была перевита еще 21 крысе, которые рандомизировались на три группы по 7: контроль (в/б введение физ. р-ра), в/б введение диоксадэта и ГИПХ с диоксадэтом. Использовались те же дозу препарата, что и ранее для оценки эффективности химиоперфузии. Все манипуляции проводились однократно через 48 часов после перевивки ОЯ. Забор образцов крови у животных трех групп осуществлялся в соответствии с определенным графиком из хвостовой вены. Для клинического анализа крови животных использовался ветеринарный автоматизированный гематологический анализатор. Статистическую обработку результатов проводили с помощью пакета специализированных компьютерных программ.

В результате исследования была получена воспроизводимая модель диссеминированного РЯ у крыс. Прививаемость ОЯ составляла 100%. Опухоль быстро прогрессировала, приводя к развитию перитонеального карциноматоза, асцита и гибели крыс на 9–17 дни после перевивки. Гистологическое исследование карциноматозных узлов брюшины и пораженных лимфатических узлов позволило диагностировать метастазы ОЯ. Характер исходной опухоли, 100% прививаемость штамма, быстрое развитие асцита делают данный штамм ОЯ адекватным для моделирования перитонеального карциноматоза при РЯ и для изучения в/б химиоперфузионного лечения.

С целью разработки экспериментальной технологии в/б химиоперфузионного лечения была впервые создана техническая установка для проведения перфузий у лабораторных животных. Операция проводится под общей анестезией, животное на протяжении всей операции находится на электрической грелке, на которой оно фиксируется электродами, подсоединяющимися к комплексу регистрации параметров витальных функций. Хирургическими ножницами делают два разреза через кожу и брюшную стенку: первый (6–8 мм) – в области правого подреберья, второй (8–10 мм) – в левой подвздошной области. В первый разрез помещается катетер для притока перфузата и цифровой термометр, во второй – катетер для оттока перфузата. Затем брюшная стенка и кожа герметично закрываются прерывистыми швами, при этом осуществляется фиксация катетеров и термометра в брюшной полости. Магистрали перфузионной системы заполняют 0,9% раствором натрия хлорида или свежеприготовленным раствором цитостатика в 0,9% растворе натрия хлорида (в случае химиоперфузии) и соединяются с катетерами в брюшной полости, создавая замкнутый контур. С помощью перистальтического перфузионного насоса раствор из резервуара по приточной магистрали нагнетается сначала в водяную баню, где он нагревается до определенной температуры, а затем – в брюшную полость. По магистрали на отток перфузат вытекает из брюшной полости, снова попадая в резервуар. По окончании перфузии раствор цитостатика из брюшной полости и магистралей сливается в резервуар, и проводится промывка брюшной полости крысы 0,9% раствором натрия хлорида (200 мл) в течение 20 минут. После этого брюшную полость освобождают от раствора, удаляют катетеры и термометр, брюшную стенку и кожу в местах разрезов зашивают в два слоя.

В ходе эксперимента были отработаны оптимальные режимы химиоперфузии: время перфузии – 45 минут, объем перфузата – 200 мл, скорость циркуляции перфузата – 10–15 мл/мин., температура перфузата в брюшной полости – 36,5–37,5°С при нормотермической перфузии и 40,5–41,5°С при гипертермической перфузии. Анализ проведенных измерений внутрибрюшинной и ректальной температуры на протяжении перфузий позволил заключить, что разработанная технология в/б химиоперфузии позволяла поддерживать температуру раствора цитостатика в брюшной полости крыс на постоянном уровне на протяжении всей перфузии, как в условиях нормотермии, так и в условиях гипертермии.

Показано, что разработанная технология и сформулированные режимы нормотермических и гипертермических перфузий не вызывают существенных изменений в показателях витальных функций крыс-самок. При выполнении гипертермической перфузии ЧСС была достоверно выше по сравнению с нормотермической перфузией. Частота дыхания крыс во время гипертермической перфузии также была выше, чем во время нормотермической перфузии ($p=0{,}011$), но не выходила за пределы референсных значений.

После отработки экспериментальной технологии были определены МПД цисплатина и диоксадэта. МПД цитостатиков для инъекционного введения были установлены ранее; МПД цисплатина при НИПХ составила 40 мг/кг массы тела, при ГИПХ – 20 мг/кг массы тела. МПД диоксадэта при НИПХ составила 30 мг/кг массы тела, при ГИПХ – 15 мг/кг массы тела. При использовании более высоких доз данных цитостатиков у крыс на 2–4 дни после операции развивалась диарея, появлялись кровянистые выделения из носа, регистрировалось резкое снижение массы тела. На 5–12 дни после операции животные погибали, при аутопсии отмечали токсический энтероколит, признаки угнетения кроветворения (гипоплазия селезенки, множественные кровоизлияния в печени, брыжейке кишечника), а в случае перфузии с цисплатином – диффузное поражение почек.

К результатам выживаемости был применен критерий Лиллиефорса, который показал, что распределение не соответствует нормальному, поэтому выживаемость крыс в группах сравнивали только по медиане продолжительности жизни (МПЖ).

На сегодняшний день, говоря о в/б химиоперфузионном лечении, в первую очередь имеется ввиду ГИПХ. НИПХ в клинической практике не используется. Нами были проанализированы результаты НИПХ с цисплатином и диоксадэтом: НИПХ как с цисплатином, так и с диоксадэтом приводила к достоверному увеличению продолжительности жизни крыс по сравнению с контрольной группой, однако цисплатин был более эффективен, поскольку для него, в отличие от диоксадэта, были получены статистически значимые различия в МПЖ по сравнению с обычным в/б введением препарата.

Но уже при гипертермии противоопухолевые эффекты диоксадэта превышали эффекты цисплатина, именно при ГИПХ с диоксадэтом достигнуто максимальное увеличение продолжительности жизни (444%) среди всех групп животных. Также как для цисплатина при нормотермии, при гипертермии для диоксадэта получены статистически значимые различия в МПЖ не только по сравнению с контролем, но и с обычным в/б введением препарата.

Таким образом для цисплатина ГИПХ достоверно не отличалась по противоопухолевым эффектам от НИПХ и даже от в/б введения препарата, а НИПХ с цисплатином ассоциирована с меньшим количеством послеоперационных осложнений и лучше переносилась животными по сравнению с ГИПХ с данным цитостатиком. Из этого можно заключить, что совокупность непосредственных и отдаленных результатов применения НИПХ и ГИПХ с цисплатином в эксперименте может являться основанием для пересмотра рациональности сочетания гипертермии и в/б химиоперфузии с цисплатином в клинической практике. В свою очередь для диоксадэта в отличие от цисплатина, сочетание гипертермии с в/б химиоперфузией обеспечило потенцирование противоопухолевой активности препарата, на основании чего диоксадэт стоит рассматривать в качестве эффективного препарата именно для ГИПХ.

Ранней послеоперационной гибели животных отмечено не было. Осложнения перфузионного лечения, встречавшиеся в разных группах, приведены в таблице. Наибольшая частота послеоперационных осложнений зарегистрирована в группе крыс, получавших ГИПХ с цисплатином – 6 (43%). Также ГИПХ с цисплатином – единственный режим химиоперфузии, для которого было отмечено развитие спаечного процесса в брюшной полости крыс. По данным анализа изменения относительной массы тела крыс после операции перфузии в режиме нормотермии переносились животными лучше, чем в режиме гипертермии. Если сравнивать цисплатин и диоксадэт, то ак для НИПХ, так и для ГИПХ минимальные значения относительной массы тела крыс после проведения перфузии регистрировались в случае использования цисплатина. Эти данные, вероятно, обусловлены тем, что цисплатин оказывал более выраженное токсическое действие, чем диоксадэт, поэтому послеоперационный период у крыс после НИПХ и ГИПХ с цисплатином протекал тяжелее, чем у крыс, получавших НИПХ и ГИПХ с диоксадэтом.

Известным преимуществом интраперитонеальной химиотерапии, в частности в/б химиоперфузии, является меньшая системная токсичность по сравнению с в/в введением цитостатиков несмотря на использование значительно более высоких доз химиопрепаратов. Анализ результатов количественного определения цисплатина в перфузате и плазме крови показал, что концентрация цисплатина в перфузионном растворе во время ГИПХ у крыс к концу времени перфузии снижалась на 46,5% от первоначального значения. При этом в плазме крови животных на протяжении ГИПХ содержание цисплатина не превышало 1,2% от общей дозы цисплатина. Поскольку ГИПХ выполнялась по закрытой методике, отсутствует фактор испарения цисплатина во время перфузии. На основании этого можно предположить, что оставшееся количество цисплатина (около 45% от общей дозы) накапливалось в органах и тканях брюшной полости крыс. Полученные результаты подтверждают фармакокинетическое преимущество ГИПХ перед в/б введением химиопрепаратов.

Согласно результатам клинического исследования диоксадэта II фазы у пациентов с разными видами опухолей (в том числе с РЯ) основным дозолимитирующим побочным эффектом в/б введения диоксадэта была лейкопения. Нами было проведено сравнение эффектов в/б введения и ГИПХ с диоксадэтом на лейкоциты в периферической крови крыс с ОЯ. Результаты измерений выражены на графике в % от контроля, не получавшего лечения. Результаты выражены в % от контроля. Доза диоксадэта для ГИПХ у крыс составляла 15 мг/кг, что в 10 раз превышает дозу данного препарата для в/б введения (1,5 мг/кг). При этом значения изучаемых гематологических параметров (лейкоцитов, гранулоцитов, лимфоцитов, моноцитов) у крыс после ГИПХ с диоксадэтом на протяжении всего периода наблюдения не опускались ниже соответствующих значений у крыс, которым не вводили данный препарат, и были достоверно выше по сравнению с животными, которым диоксадэт вводился в/б в меньшей дозе. Более того, у крыс, у которых выполнялась ГИПХ с диоксадэтом регистрировались гранулоцитоз и лимфоцитоз. В литературе имеются данные о том, что данные состояния могут быть индикаторами эффективности или неэффективности проводимой химиотерапии. Так, было показано, что у больных раком легкого, толстой кишки, молочной железы и простаты при достижении объективной регрессии опухоли имеет место лимфоцитоз, и число лимфоцитов было значительно выше по сравнению со значениями, которые были до начала лечения. Поскольку в данной серии эксперимента выживаемость крыс с ОЯ не оценивалась, трудно сказать, свидетельствуют ли изменения в абсолютном содержании лимфоцитов и гранулоцитов о преимуществах ГИПХ с диоксадэтом перед в/б введением данного цитостатика. Но с учетом результатов выживаемости, полученных в предыдущей серии экспериментов, можно предположить, что лимфоцитоз и гранулоцитоз действительно свидетельствуют об эффективности проводимой химиотерапии и, соответственно, говорят в пользу ГИПХ с диоксадэтом.

V.P. Andreev, K.B. Kirsanov, P.F. Pletnev

CONSTRUCTING AN AUTO-CONFIGURABLE NETWORK OF MECHATRONIC DEVICES FOR PROBLES OF GEOGRAPHICALLY DISTRIBUTED CONTROL*

Moscow State University of Technology "STANKIN"; International Laboratory "Sensorika"; Russian State University for the Humanities, Moscow, Russia
andreevvipa@yandex.ru, kkirsanov@gmail.com, cpp.create@gmail.com

We describe the architecture of software developed for an auto-configurable geographically distributed network of mechatronic devices, which can be represented by mobile robots. The hardware and software architecture is proposed for interaction mechatronic devices of various models and manufacturers. Reference realizations of protocols for message exchange and drivers of x86 and Arduino platforms were created. We have created the graphical user interfaces for all components of the system (TV-cameras with function PTZ, ultrasonic distance meters, etc.) and special-purpose decentralized "server" software that ensures the collection of statistics and system integrity.

Keywords: spatially distributed control, robotic system, mobile robot, mechatronic device, automatic configuration, dynamic reprogramming, and network technology.

Introduction

The software designed for the interaction of application software with the network and unifying the interaction between programs in heterogeneous computing platforms is termed as middleware [1]. This kind of software serves as a subsystem of larger software. Middleware has been intensively studied in modern database and Internet technologies; however, these studies for robotics have not reached the same level. Most likely, this is associated with the fact that until recently the software for robotic systems has been rather simple (in terms of software engineering) and has not gone beyond simple interactions between control objects.

In the course of the implementation of the software for geographically distributed control of a group of mobile robotic devices [2], we analyzed the existing systems with similar functionality: namely, Microsoft Robotics Developer Studio (MRDS), Robotics Operating System (ROS), and their precursors such as Palyer Project, LAAS GenoM and URBI (see Wikipedia). These systems can be roughly classified as "large", i.e., comprising many components to solve various problems: SLAM (Simultaneous Localization and Mapping), calibration of sensors, image processing, etc. However, there also exist "small" robotic frameworks, such as Concurrency and Coordination Runtime (included in MRDS) providing merely message passing between components. These systems are designed for operating in a local area network (LAN) with a stable communication channel and have almost no tools designed for correct failure recovery in the data transmission channel. But this problem arises whenever mobile robotic systems (MRSs) are to be operated in the case when the communication channel includes a radio channel.

Thus, the technology of geographically distributed control of a group of mobile MRSs requires the development of a qualitatively new software architecture.

The proposed architecture

The proposed architecture is based on the principle of the organization of an information-measuring and control system (IMCS) of the robotic system as a local area network with mobile nodes [3] and on the "concept of drivers". This concept implies that each node of the LAN is an electronic (such as a microcontroller) or mechatronic (such as an electric actuator with a control system) device, and the mobile robot (MR) is represented as a composition of a few mechatronic devices and their drivers. The driver of each mechatronic device on the onboard computer of the mobile robot is a separate computing process, and the joint operation of these processes should be arranged and synchronized. To solve these problems, we use the following approaches:

– Each command or data from sensors are supplied with a time marker when passing each node of the LAN.
– Each driver contains its own copy of the "name server", which stores information about neighboring (in terms of the network topology) drivers.

* This study was partially supported by the Russian Foundation for Basic Research, project nos.13-07-01032 and 13-07-00988

– Each driver involves a dynamically generated *interaction graph*, which stores information about neighbors.
– A textual (ASCII) format is used for data exchange.
– Data exchange makes it possible to arrange the transmission of both individual commands and entire programs.

Supplying messages with a time marker allows one to avoid violation of the sequence of events in case of failures, correctly synchronize the operation of drivers, and take into account the delays and the time difference between several geographically distributed network nodes. The vector clock algorithm allows for a synchronization independent of the real-time clock on onboard computers.

The "name server" is a specialized software that scans the network every 20 seconds and looks for similar services. When such services have been detected, the "name server" exchanges all available data with them using an algorithm close to the distributed hash tables (DHT). This gives rise to the quality of *decentralization*. For example, a robotic system configured within a specific LAN can be disconnected from it without changes and without affecting the normal operation of the robotic system.

The *interaction graph* is a data structure that stores information about neighboring (in terms of the network topology) drivers and their interactions. The interaction graph is automatically recovered after communication breaks even if the network topology is slightly changed. This ensures that the network data topology can be recovered after its destruction caused by failures in communication channels. This gives rise to the quality *autoconfiguration*, which makes it possible to dynamically modify the topology of the geographically distributed IMCS of the group of mobile robots but within the same network.

The textual format of data exchange makes it possible to *simplify the debugging* of the software and arrange an interaction with the system *without additional libraries*, which is extremely important in problems of integration.

To integrate the robotic system into a geographically distributed group, it was necessary not only to arrange the interaction between electro-mechanical components of the robot and the onboard computer, but also to integrate its IMCS directly into the general control hierarchy.

To build a formal description of interaction in multi-agent network, we used the *actor model* [4]. The mechanism for message transmission is based on the ZeroMQ library (http://zeromq.org/), which serves as a high-level "wrapper" over standard network sockets of the operating system. This mechanism includes a number of features such as the *automatic recovery of communication after failure without loss of the context*, the possibility of tunneling through the low-layer protocols of UDP, TCP, and IPC, or PGM (Pragmatic General Multicast). In addition, unlike more complex protocols (such as Concurrency and Coordination Runtime), ZeroMQ is sufficiently simple, which allowed it to be implemented directly on the Arduino microcontroller with an Ethernet Shield module, but with some limitations due to its low performance. For example, the maximum frequency of command processing in a test run with this microcontroller was 20 Hz.

Fig. 1 shows the general schematic of the interaction: two mechatronic devices **rc1** and **rc2** (RobotComponent) pass the registration procedure asynchronously in the name server **ns** (NameServer). Then, the control system **cs** (ControlSystem) requests the list of registered devices to perform synchronous and asynchronous interaction with mechatronic devices. In this case, the name can be an IP-address and its port, an arbitrary text (for example, "engine") or a full path in the hierarchy (for example, "University→Laboratory1→Robotino→Engines →3→PWM".

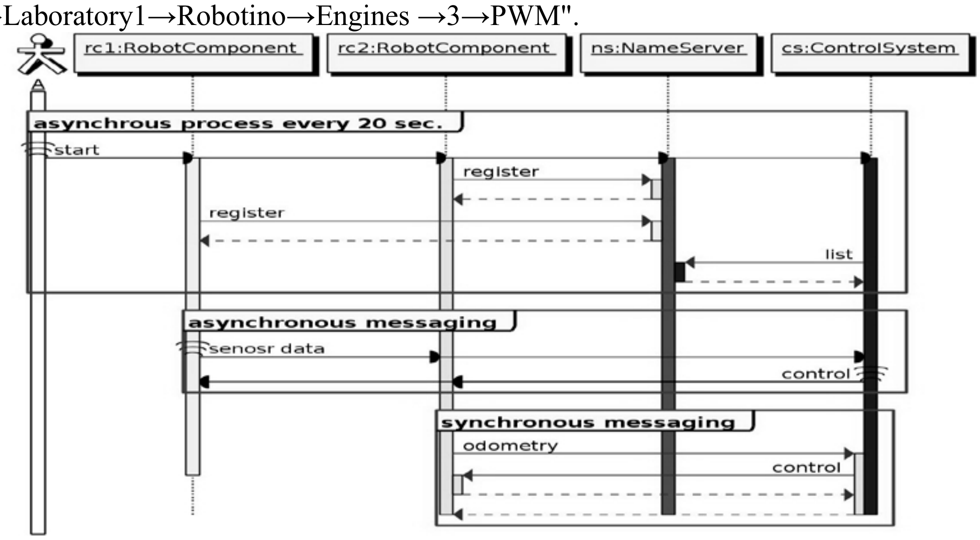


Fig. 1. Mechanism of network interaction in the proposed architecture.

The driver of each device provides:

– a naming and identification mechanism (way of accessing the device by its name);
– a command sending and receiving, including by another driver.

The messaging scheme is shown in Fig. 2. The control commands and data are transmitted in the JSON format, which is sufficiently simple and can be implemented on low-power processors including AVR (Arduino). JSON is a textual (ASCII) format for structured data, capable of serializing (i.e., representing as a sequence of bytes) lists (vector, array) and associative arrays (i.e., sets of "key-value" pairs), which makes it possible to manually generate control commands without specialized libraries, as required in other similar systems. In addition, this solution considerably simplifies the use of multiple programming languages or software and hardware platforms. This is achieved by the fact that JSON and ZeroMQ parsers have already been implemented for the vast majority of platforms and languages.

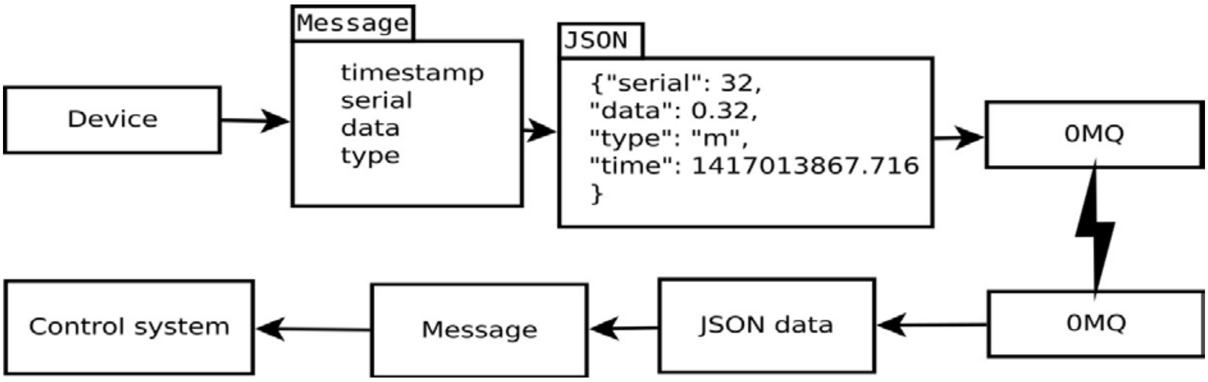


Fig. 2. Schematic of message transmission: Device generates Message, which is encoded into the JSON format and transmitted to 0MQ (ZeroMQ).

Also, it becomes possible to supply the transmitted data with additional information without modifying their host software or arbitrarily change the order of the fields in a single message. This makes it possible to arrange the transmission of both individual commands and entire programs, which are executed (immediately after being received) by an interpreter available in onboard computers [5]. In this way, one can arrange *dynamic reprogramming* of a mechatronic device; i.e., without stopping or "rebooting" onboard computing devices of a MR, one can update its software or adjust its operation. This considerably simplifies the concurrent support for different versions of a driver in a single network of mechatronic devices in problems of geographically distributed control.

The JSON parser is a standard library in many programming languages. However, for AVR, we had to develop its own parser that implements merely a minimum required subset of JSON without support of arbitrary nested structures but with a satisfactory performance (40 Hz).

The information redundancy arising from its textual representation has no significant effect on the data throughput because the commands are usually compact even in a textual representation and can be compared in size with the IP packet header (20 bytes).

However, this protocol is inefficient for transmitting multichannel video; therefore, well-proven protocols such as RTSP (Real Time Streaming Protocol) and M-JPEG over HTTP are used in this case.

To visualize the components detected in the network, we developed control software for the operator screen. Interface was created by the control software, which represents all detected components as a tree (see Fig. 3).

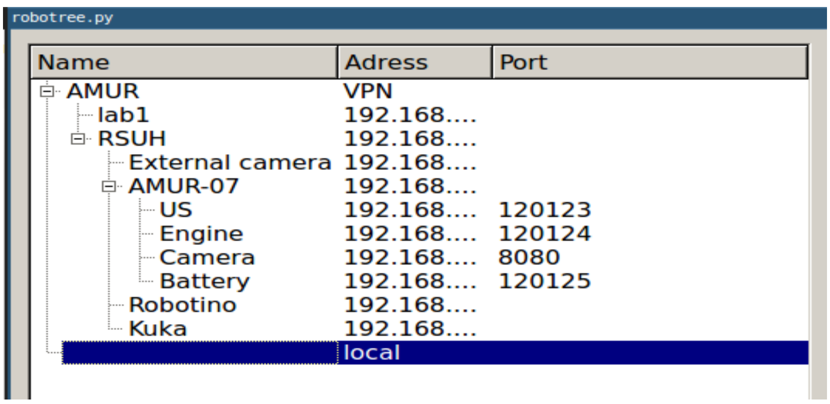


Fig. 3. One of the windows of the screen interface. Tree representation of AMUR-07 components: ultrasonic sensors (US), engines (Engine), TV-camera (Camera), and rechargeable battery (Battery)

Conclusion

The proposed architecture of network software proved its efficiency in creating the geographically distributed system of control over the group of educational mobile robots consisting of two robots of the *AMUR* (Autonomous Educational Mobile Robot, IL “Sensorika”) and three *Robotino* (Festo concern, Germany) type robots. The system operates between the MSTU STANKIN (Moscow) and the Center for Technological Support of Education of the International Institute of New Educational Technologies (CTSE IINET) of RSUH (Moscow). A similar communication channel exists between the Keldysh Institute of Applied Mathematics, Russian Academy of Sciences (Moscow), CTSE IINET RSUH, and the Far East Federal University (Vladivostok). This information and communication architecture can be used in distance learning systems for arranging the access of students to real mechatronic systems of different models and manufacturers [6].

In future, the reliability of the system is expected to enhance due to the verification of transmitted data using a type inference performed by the Hindley–Milner algorithm because the interaction is currently based on JSON dealt with an untyped way and each driver performs parsing independently. As a result, the system becomes unprotected from "wrong" data arising from a programmer error.

1. Wolfgang Emmerich. The impact of research on the development of middleware technology / Wolfgang Emmerich, Mikio Aoyama, Joe Sventek // ACM Transactions on Software Engineering and Methodology. – N. Y.: ACM, 2008. – T. 17. – No 4. – P. 19–48.
2. Andreev V.P. Spatially distributed “multi-operator” control of robotized systems with the use of network technologies / Andreev V.P., Kirsanov K.B. // Extreme Robotics. Proceedings of the International Scientific-Technical Conference. – St. Petersburg, October 8–9, 2015.
3. Andreev V.P. Group control of mobile robots with the help of Ethernet-technologies / Andreev V.P., Pryanichnikov V.E., Prysev E.A. // Proceedings of the XXI International Scientific-Technical Conference: Extreme Robotics. – St. Petersburg: Politekhnika-servis, 2010. – P. 427–430.
4. Hewitt Carl. A universal modular actor formalism for artificial intelligence / Hewitt Carl, Peter Bishop, and Richard Steiger // In Proceedings of the 3rd international joint conference on Artificial intelligence. Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1973. – P. 235–245.
5. Kirsanov Kirill. The Architecture of Robotics Control Software for Heterogeneous Mobile Robots Network / Kirsanov Kirill // Procedia Engineering 01/2014; 69:216–221. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.02.224.
6. Education on the basis of virtual learning robotics laboratory and group-controlled robots / Victor Andreev, Sergey Kuvshinov, Valentin Pryanichnikov, Yury Poduraev // 24th DAAAM Int. Symp., 2013. Procedia Engineering, 2014. – V.69. – P. 35–40.

В.П. Андреев, К.Б. Кирсанов, П.Ф. Плетенев

ПОСТРОЕНИЕ АВТОКОНФИГУРИРУЕМОЙ СЕТИ МЕХАТРОННЫХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ЗАДАЧ ТЕРРИТОРИАЛЬНО-РАСПРЕДЕЛЕННОГО УПРАВЛЕНИЯ*

МГТУ «СТАНКИН»; МЛ «Сенсорика»; МИНОТ РГГУ, Москва
andreevvipa@yandex.ru, kkirsanov@gmail.com, cpp.create@gmail.com

Описана архитектура программного обеспечения, разработанная для автоматически конфигурируемой территориально-распределённой сети мехатронных устройств, в качестве которых могут выступать мобильные роботы. Предложена программно-аппаратная архитектура взаимодействия мехатронных устройств разных моделей и производителей. Созданы референсные реализации протоколов обмена сообщениями и драйверов для платформ x86 и Arduino. Реализованы графические интерфейсы пользователя для всех компонентов системы (купольные PTZ-телекамеры, УЗ дальномеры и т.п.) и специализированное децентрализованное “серверное” программное обеспечение, осуществляющее сбор статистики и обеспечивающее целостность системы.

Ключевые слова: территориально-распределённое управление, робототехнический комплекс, мобильный робот, мехатронное устройство, автоматическое конфигурирование, динамическое перепрограммирование, сетевые технологии.

* Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ, гранты 13-07-01032 и 13-07-00988

Введение

Для обозначения программного обеспечения (ПО), предназначенного для взаимодействия прикладного ПО с сетью и обеспечивающего унификацию взаимодействия между программами в условиях неоднородности вычислительных платформ, используется термин «Связующее программное обеспечение» (Middleware) [1]. Такого рода ПО выступает в качестве подсистемы в более крупном программном обеспечении. Если в современных технологиях Баз Данных (БД) и Интернет связующее ПО подробно изучается, то применительно к робототехнике эти исследования не достигли аналогичного уровня. По всей видимости, это связно с тем, что до недавнего времени ПО для робототехнических систем было достаточно простым (с точки зрения программной инженерии) и не выходило за рамки организации простейших взаимодействий между объектами управления.

В процессе реализации программного обеспечения для системы территориально-распределённого управления группой мобильных робототехнических устройств [2], были проанализированы уже существующие системы, обеспечивающие схожую функциональность, а именно, Microsoft Robotics Developer Studio (MRDS), Robotics Operating System (ROS), а также их предшественники, такие как Palyer Project, LAAS GenoM и URBI (см. Wikipedia). Эти системы можно условно отнести к “большим”, т.е. включающим в себя множество компонентов для решения разнообразных задач: SLAM (Simultaneous Localization and Mapping), калибровка сенсоров, обработка изображений и т.п. Однако существуют и “малые” робототехнические фреймворки (fraimeworks), например, Concurrency and Coordination Runtime (включён в MRDS), осуществляющие лишь передачу сообщений между компонентами. Перечисленные системы рассчитаны на работу в рамках локальной вычислительной сети (ЛВС) с устойчивой связью и практически не содержат средств, предназначенных для корректного восстановления после сбоев в канале передачи данных. Но эта задача возникает всегда, когда необходимо обеспечить работу мобильных робототехнических комплексов (РТК), когда в коммуникационном канале присутствует радиоканал.

Таким образом, в процессе создания технологии территориально-распределённого управления группой мобильных РТК потребовалась разработка качественно новой программной архитектуры.

Предлагаемая архитектура

В основу предлагаемой архитектуры положен принцип организации информационно-измерительной и управляющей системы (ИИУС) робототехнического комплекса в виде локальной вычислительной сети с мобильными узлами [3] и «концепция драйверов». В рамках этой концепции каждый узел такой ЛВС является электронным (например, микроконтроллер) или мехатронным устройством (например, электроприводы с системой управления), а мобильный робот (МР) представляется как композиция нескольких мехатронных устройств и их драйверов. На бортовой ЭВМ мобильного робота драйвер каждого мехатронного устройства представляет собой отдельный вычислительный процесс, и совместную работу этих процессов необходимо организовать и синхронизировать. Для решения данных задач используются следующие подходы:

– Каждая команда или данные от сенсоров снабжаются меткой времени при прохождении каждого узла ЛВС.
– Каждый драйвер содержит собственный экземпляр «Службы имён», в которой хранится информация о соседних (с точки зрения сетевой топологии) драйверах.
– В каждом драйвере динамически формируется граф взаимодействий, в котором сохраняется информация о соседях.
– Используется текстовый (ASCII) формат обмена данными.
– Обмен данными позволяет организовать передачу не только отдельных команд, но и целых программ.

Добавление метки времени в сообщения позволяет избежать нарушения последовательности событий при сбоях, точно синхронизировать работу драйверов и учесть временные задержки, а также разность во времени между несколькими территориально-распределёнными узлами сети. За счёт использования алгоритма векторных часов удаётся выполнить синхронизацию, независимую от показаний часов реального времени бортовых ЭВМ.

«Служба имён» – это специализированное ПО, которое каждые 20 секунд сканирует сеть и ищет аналогичные службы, а обнаружив, – обменивается с ними всей имеющейся информацией по алгоритму, близкому к распределённым хеш-таблицам – Distributed Hash Table (DHT). Благодаря этому появляется качество *децентрализованности*. Так, например, робототехнический комплекс, настроенный в рамках конкретной ЛВС, без изменений может быть отключён от неё, и при этом не будет нарушено его нормальное функционирование.

Граф взаимодействий представляет собой структуру данных, хранящую информацию о соседних (с точки зрения сетевой топологии) драйверах и их взаимодействиях. Граф взаимодействий автоматически восстанавливается после нарушений связи даже в случае незначительного изменения топологии сети. Тем самым обеспечивается восстановление информационной топологии сети после её разрушения в результате сбоев в каналах связи. Появляется качество *автоконфигурирования*, что позволяет динамически изменять топологию территориально-распределённой ИИУС группировки МР, но в рамках одной сети.

Текстовый формат обмена данными позволяет *упростить отладку* разрабатываемого ПО и организовать взаимодействие с системой *без дополнительных библиотек*, что крайне важно в задачах интеграции.

Для обеспечения интеграции РТК в территориально-распределённую группировку необходимо было реализовать не только взаимодействие между электромеханической частью робота и бортовой ЭВМ, но и интегрировать его ИИУС непосредственно в общую иерархию управления.

Для формального описания взаимодействия в многоагентной сети была применена *модель акторов* [4]. В качестве механизма передачи сообщений используется библиотека ZeroMQ (http://zeromq.org/), которая выполняет роль высокоуровневой «обёртки» над стандартными сетевыми сокетами операционной системы. Этот механизм включает ряд функций, таких как *автоматическое восстановление связи после обрыва без потери контекста*, возможность туннелирования через протоколы нижнего уровня: UDP, TCP, IPC, или через PGM (Pragmatic General Multicast). Кроме того, в отличие от более сложных протоколов (например, Concurrency and Coordination Runtime), ZeroMQ достаточно прост, что даёт возможность реализовать его непосредственно на микроконтроллере Arduino с модулем Ethernet Shield, но с некоторыми ограничениями, связанными с его малой производительностью. Так, при использовании данного микроконтроллера максимальная частота обработки команд в тестовой реализации составила 20 Гц.

На Рис. 1. приведена общая схема взаимодействия: два мехатронных устройства **rc1** и **rc2** (RobotComponent) асинхронно проходят процедуру регистрации в Сервисе Имён **ns** (NameServer). Затем Система Управления **cs** (Control System), запросив список зарегистрированных устройств, осуществляет синхронное и асинхронное взаимодействие с мехатронными устройствами. Именем в данном случае может быть IP-адрес и его порт, произвольный текст, например, “двигатель”, или целый путь в иерархии, например, “Университет→лаборатория1→Robotino→ Двигатели→3→ШИМ”.

Драйвер каждого устройства обеспечивает:

– схему именования и идентификации (способ получения доступа к устройству по имени);
– передачу и получение команд, в том числе другим драйвером.

Рис. 1. Механизм сетевого взаимодействия в рамках предложенной архитектуры

Схема передачи сообщений приведена на рис.2. Команды управления и данные передаются в формате JSON, который достаточно прост и может быть реализован на маломощных процессорах, в том числе на AVR (Arduino). JSON это текстовый (ASCII) формат представления структурированных данных, позволяющий сериализировать, т.е. представлять в виде последовательности байт, списки (вектор, массив) и ассоциативные массивы, т.е. наборы пар “ключ-значение”, что даёт возможность вручную формировать управляющие команды, не прибегая к специализированным библиотекам, как это требуется в других подобных системах. Кроме того, данное решение существенно облегчает использование нескольких языков программирования или программно-аппаратных платформ. Это достигается тем, что парсеры JSON и ZeroMQ уже реализованы для абсолютного большинства платформ и языков.

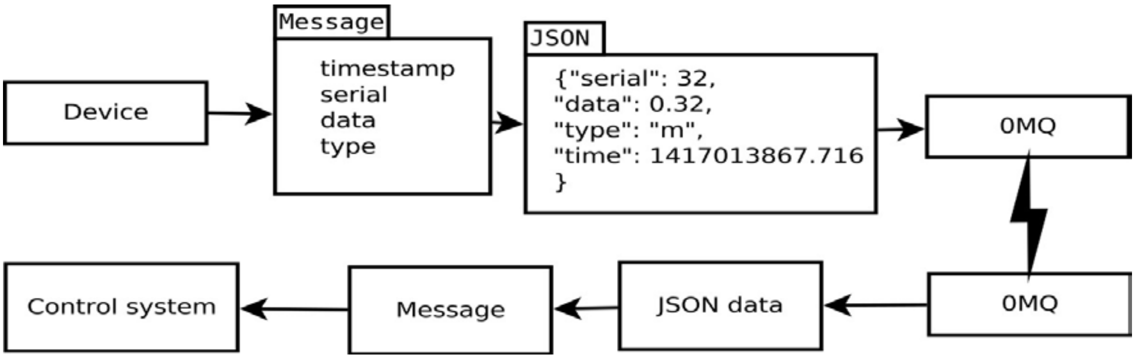


Рис.2. Схема передачи сообщений: устройство (Device) формирует сообщение (Message), которое кодируется в формат JSON и передается в 0MQ (ZeroMQ)

Также появляется возможность снабжать передаваемые данные дополнительной информацией, не модифицируя принимающее их программное обеспечение, или произвольным образом менять порядок полей в рамках одного сообщения. Благодаря этому становится возможным организовать передачу не только отдельных команд, но и целых программ, которые сразу по получению исполняются интерпретатором, функционирующим на бортовой ЭВМ [5]. Таким образом организуется *динамическое перепрограммирование* мехатронного устройства, т.е., не останавливая или «перезагружая» бортовые вычислительные устройства МР, можно обновлять его ПО или корректировать его работу. Это существенно упрощает одновременную поддержку различных версий одного драйвера в рамках единой сети мехатронных устройств в задачах территориально-распределённого управления.

Синтаксический анализатор (Parser) JSON является стандартной библиотекой во многих языках программирования. Однако для AVR пришлось создать собственный синтаксический анализатор (парсер), реализующий лишь минимально необходимое подмножество JSON – без поддержки структур произвольной вложенности, но обеспечивающий удовлетворительную производительность – 40 Гц.

Избыточность информации, возникающая за счёт её текстового представления, не оказывает существенного влияния на пропускную способность, поскольку команды, как правило, компактны даже в текстовом представлении и сравнимы по размеру с заголовком IP пакета – 20 байт.

Однако этот протокол малоэффективен для передачи многоканального видео, поэтому для него используются хорошо зарекомендовавшие себя протоколы, такие как RTSP (Real Time Streaming Protocol) или M-JPEG поверх HTTP.

С целью визуализации обнаруженных в сети компонент для экранного интерфейса оператора было создано управляющее программное обеспечение, представляющее все обнаруженные компоненты в виде дерева, как показано на Рис.3.

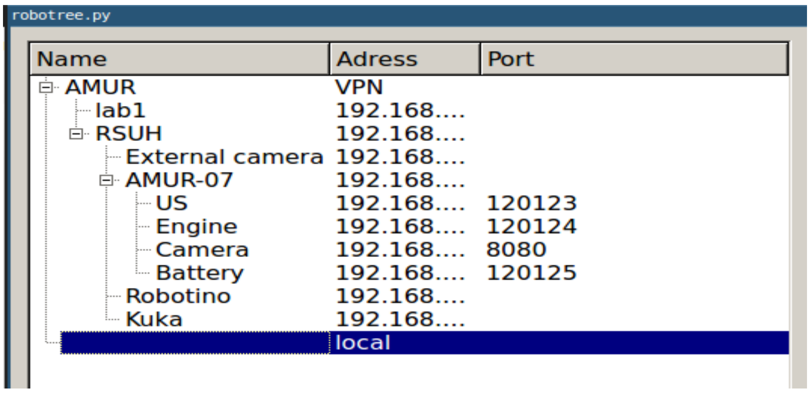


Рис. 3. Одно из окон экранного интерфейса: представление в виде дерева обнаруженных у робота AMUR-07 компонент: УЗ датчики (US), электродвигатели (Engine), ТВ-камера (Camera) и аккумуляторная батарея (Battery)

Заключение

Предложенная архитектура сетевого ПО показала свою эффективность при создании территориально-распределённой системы управления группировкой учебных мобильных роботов, состоящей из 2-х роботов типа «АМУР» (Автономный Учебный Мобильный Робот, МЛ «Сенсорика») и 3-х роботов «Robotino» (немецкий концерн Festo). Система функционирует между МГТУ «СТАНКИН» (г. Москва) и Центром технологической поддержки образования Международного института новых образовательных технологий (ЦТПО МИНОТ) РГГУ (г. Москва). Аналогичный канал действует также между ИПМ им. Келдыша РАН (г. Москва), ЦТПО МИНОТ РГГУ и ДВФУ (г. Владивосток). Данная информационно-коммуникационная архитектура может быть использована в системе дистанционного образования для организации доступа учащихся к реальным мехатронным системам разных моделей и производителей [6].

В дальнейшем предполагается повысить надёжность системы за счёт верификации передаваемых данных с использованием вывода типов – алгоритм Хиндли-Милнера (Hindley-Milner), так как на данный момент для организации взаимодействия используется нетипизированный способ представления JSON, и каждый драйвер самостоятельно занимается синтаксическим разбором. В результате система оказывается не защищённой от «неправильных» данных, возникающих вследствие ошибки программиста.

1. Wolfgang Emmerich. The impact of research on the development of middleware technology / Wolfgang Emmerich, Mikio Aoyama, Joe Sventek // ACM Transactions on Software Engineering and Methodology. – N. Y.: ACM, 2008. – T. 17. – No 4. – P.19 – 48.
2. Андреев В.П. Территориально-распределённое многооператорное управление роботизированными системами с использованием сетевых технологий / Андреев В.П., Кирсанов К.Б.// *(настоящий сборник)*, 2015г. – С.
3. Андреев В.П. Групповое управление мобильных роботов средствами Ethernet-технологий / Андреев В.П., Пряничников В.Е., Прысев Е.А. // Труды XXI Международной научно-технической конференции: Экстремальная робототехника. – СПб.: Изд-во «Политехника-сервис», 2010. – С.427 – 430.
4. Hewitt Carl. A universal modular actor formalism for artificial intelligence / Hewitt Carl, Peter Bishop, and Richard Steiger // In Proceedings of the 3rd international joint conference on Artificial intelligence. Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1973. – P. 235-245.
5. Kirsanov Kirill. The Architecture of Robotics Control Software for Heterogeneous Mobile Robots Network / Kirsanov Kirill // Procedia Engineering 01/2014; 69:216–221. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.02.224.
6. Education on the basis of virtual learning robotics laboratory and group-controlled robots / Victor Andreev, Sergey Kuvshinov, Valentin Pryanichnikov, Yury Poduraev // 24th DAAAM Int. Symp., 2013. Procedia Engineering, 2014. – V.69. – P.35 – 40.

(24-28 сентября 2012 г.), Изд-во ЮФУ, Ростов-на-Дону, 2012, с. 97-99.

V. Bashlovkina, L. Boykov, L. Stankevich

CONTROL OF GROUP BEHAVIOR OF INDEPENDENT ROBOTS IN DYNAMIC ENVIRONMENTS

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
Stankevich_lev@inbox.ru

В.В. Башловкина, Л.В. Бойков, Л.А. Станкевич

УПРАВЛЕНИЕ ГРУППОВЫМ ПОВЕДЕНИЕМ АВТОНОМНЫХ РОБОТОВ В ДИНАМИЧЕСКИХ СРЕДАХ

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Stankevich_lev@inbox.ru

В настоящее время создаются различные варианты мобильных роботов, способных целенаправленно работать в автономном режиме без внешнего управления. Такие автономные роботы могут применяться для выполнения задач транспортирования или манипулирования объектами на значительном удалении от людей, например, в опасных для человека экстремальных условиях. Часто автономные роботы оснащаются интеллектуальными системами управления, что значительно увеличивает их функциональные возможности. Интеллектуальное управление позволяет организовать групповую работу автономных роботов, где каждый робот должен выполнять свою работу в коллективе себе подобных не мешая или даже помогая другим роботам. Наиболее сложным вариантом групповой работы является так называемая командная работа, где каждый робот должен учитывать определенные обязательства перед другими роботами команды. Команды роботов могут решать задачи в условиях противодействия, что актуально, например, для военных или игровых приложений.

В данной работе рассмотрены принципы и методы организации групповой работы автономных роботов. В качестве примера рассмотрено игровое приложение – футбол роботов.

1. Постановка задачи.

Рассмотрим задачу группового управления роботов. Пусть некоторая группа $\Re$, состоящая из N роботов R_j ($j=\overline{1,N}$) (рис. 1), функционирует в некоторой среде $\mathbf{E}$ с групповой целью. Состояние каждого робота $R_j \in \Re$ ($j=\overline{1,N}$) в момент времени t описывается вектор-функцией $\mathbf{R}_j(t)=[r_{1,j}(t), r_{2,j}(t), \dots, r_{h,j}(t)]^T$, где $r_{i,j}(t)$ ($i=\overline{1,h}$) – переменные состояния j-го робота. Состояние группы роботов $\Re$ задается вектор-функцией $\Re(t)=\langle \mathbf{R}_1(t), \mathbf{R}_2(t), \dots, \mathbf{R}_N(t)\rangle$. Состояние среды вокруг j-го робота в момент времени t описывается вектор-функцией $\mathbf{E}_j(t)=[e_{1,j}(t), e_{2,j}(t), \dots, e_{w,j}(t)]^T$, где $e_{l,j}(t)$ ($l=\overline{1,w}$) – переменные участка среды вокруг j-го робота. Состояние стационарной среды в целом в момент времени t описывается вектор-функцией $E(t)=\langle \mathbf{E}_1(t), \mathbf{E}_2(t), \dots, \mathbf{E}_N(t)\rangle$. При этом, если роботы отсутствуют, то $\mathbf{E}_i(t)=\mathbf{E}_i=const$.

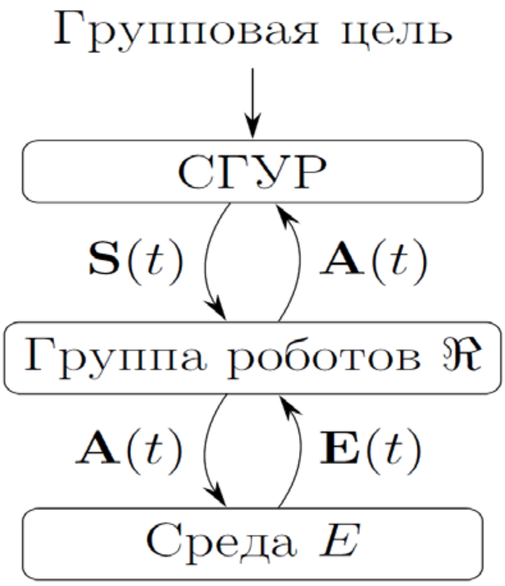


Рис. 1. Обобщенная схема процесса управления группой роботов

Роботы и среда, взаимодействуя друг с другом, образуют систему «группа роботов – среда». Под состоянием системы «группа роботов – среда» в момент времени t будем понимать состояние, описываемое парой $\mathbf{S}_c=\langle \Re, \mathbf{E}\rangle$. Под начальным состоянием системы «группа роботов – среда» в момент t_0 будем понимать ситуацию $\mathbf{S}_c^0=\langle \Re^0, \mathbf{E}^0\rangle$, определяемую вектор-функциями:

$$\Re^0=\Re(t_0), \quad \mathbf{E}^0=\mathbf{E}(t_0), \tag{1}$$

Конечное состояние в момент времени t_f $\mathbf{S}_c^f=\langle \Re^f, \mathbf{E}^f\rangle$ будет определяться вектор-функциями:

$$\Re^f=\Re(t_f), \quad \mathbf{E}^f=\mathbf{E}(t_f), \tag{2}$$

Текущее состояние системы «группа роботов – среда» момент времени $\hat{t}$ $\mathbf{S}_c^{\hat{t}}=\langle \Re^{\hat{t}}, \mathbf{E}^{\hat{t}}\rangle$ определяется вектор-функциями $\Re^{\hat{t}}=\Re(\hat{t})$ и $\mathbf{E}^{\hat{t}}=\mathbf{E}(\hat{t})$. Роботы группы $\Re$, выполняя определенные действия, должны перевести начальную ситуацию в конечную.

Каждый робот $R_j \in \Re$ ($j=\overline{1,N}$) может выполнять действия $\mathbf{A}_j(t)=[a_{1,j}(t), a_{2,j}(t), \dots, a_{m,j}(t)]^T$, причем множество действий, которые может выполнять робот $R_t \in \Re$, представлены точками m-мерного подпространства действий $\{A\}_j$. Множество действий группы роботов, есть объединение множеств действий отдельных роботов группы $\Re$: $\{\mathbf{A}_c\} = \{\mathbf{A}\}_1 \cup \{\mathbf{A}\}_2 \cup \ldots \cup \{\mathbf{A}\}_N$. Эти действия вырабатываются системой управления группой роботов (СУГР) (рис. 1),

Действия, выполняемые группой роботов в момент времени t, можно описать с помощью непрерывной вектор-функции $\mathbf{A}_c(t) = \langle \mathbf{A}_1(t), \mathbf{A}_2(t), \ldots, \mathbf{A}_N(t) \rangle$, а изменение состояния системы «группа роботов – среда» – системой уравнений вида

$$\dot{\mathbf{S}}_c = \mathbf{f}_c(\mathbf{S}_c(t), \mathbf{A}_c(t), \mathbf{g}(t), t)\,. \qquad (3)$$

При этом на ситуации, а также на действия роботов группы могут накладываться некоторые ограничения, аналогичные тем, которые имеют место при функционировании одиночного робота:

$$\mathbf{S}_c(t) \in \{\mathbf{S}_c^p(t)\} \subset \{\mathbf{S}_c\}\,, \qquad (4)$$

где $\{\mathbf{S}_c^p(t)\}$ – множество допустимых в момент времени t состояний системы, и

$$\mathbf{A}_c(t) \in \{\mathbf{A}_c^p(t)\} \subset \{\mathbf{A}_c\}\,, \qquad (5)$$

где $\{\mathbf{A}_c^p(t)\}$ – множество допустимых в момент времени t действий группы роботов.

Задача группового управления роботами заключается в определении на интервале $[t_0, t_f]$ таких действий $\overline{\mathbf{A}}_j(t)$ для каждого робота $R_j \in \Re$, при которых удовлетворяются система (3), начальные условия (1), конечные условия (2), ограничения (4), (5) и обеспечивается экстремум функционала

$$\begin{aligned} \mathbf{Y}_c &= \mathbf{\Phi}(\mathbf{S}_c^f, t_f) + \int_{t_0}^{t_f} \mathbf{F}(\mathbf{S}_c(t), \mathbf{A}_c(t), \mathbf{g}(t), t)\,dt = \\ &= \Phi(\mathbf{R}_1^f, \mathbf{R}_2^f, \ldots, \mathbf{R}_N^f, \mathbf{E}^f, \mathbf{g}(t), t_f) + \\ &+ \int_{t_0}^{t_f} \mathbf{F}(\mathbf{R}_1(t), \mathbf{R}_2(t), \ldots, \mathbf{R}_N(t), \mathbf{A}_1(t), \mathbf{A}_2(t), \ldots, \mathbf{A}_N(t), \mathbf{g}(t), t)\,dt\,, \end{aligned} \qquad (6)$$

с помощью которого задается групповая цель и оценивается качество процесса управления.

Очевидно, что для задач группового управления роботами, функционирующими в условиях динамических недетерминированных сред, необходимо еще, чтобы это управление было найдено за достаточно малое время, за которое состояние системы $\mathbf{S}_c(t) = \langle \Re(\tau), \mathbf{E}(t) \rangle$ существенным образом не изменится. Это требует дополнительного ограничения и на время нахождения управления $\overline{\mathbf{A}}_j(t)$ ($j = \overline{1, N}$) в виде условия $t_p \le \tau_p$, где t_p – время, затрачиваемое на нахождение этого управления, а τ_p – максимально допустимое время определения текущего управления $[\overline{\mathbf{A}}]_j(t)$ ($j = \overline{1, N}$).

2. Подход к решению задачи группового управления роботами

Решение задачи управления группой роботов заключается в отыскании непрерывной вектор-функции $\overline{\mathbf{A}}_c(t)$ оптимальных управлений – действий $\mathbf{A}_j(t)$ роботов R_j, $j = \overline{1, N}$ группы. Целью управления является перевод системы «группа роботов – среда» из некоторого начального состояния в заданное конченое (целевое) состояние так, чтобы с учетом уравнений связи (3) и ограничений (4), (5) функционал (6) достигал экстремального значения. Это осуществляется за счет оптимальных действий $\overline{\mathbf{A}}_j(t)$ роботов группы.

Будем считать, что действие $\mathbf{A}_c(t)$ дискретно, т. е. представляет собой разрывную вектор-функцию времени, которая изменяется скачкообразно в определенные моменты времени $t \cdot \Delta t$, где t –

дискретное время, т.е. $t = 0,1,2,\ldots$, а Δt – интервал времени, через который осуществляется набор следующего действия. В этом случае целевые функционалы задач управления можно записать так:

$$\mathbf{Y}_c = \sum_{t=t_0}^{t_f-1} \mathbf{F}(\Re(t), \mathbf{E}(t), \mathbf{A}_c(t), \mathbf{g}(t))\Delta t \qquad (7)$$

и

$$\mathbf{Y}_c = \sum_{t=t_0}^{t_f-1} \mathbf{F}(\Re(t), \mathbf{E}(t), \mathbf{A}_c(t))\Delta t - \sum_{t=t_0}^{t_f} \mathbf{G}(\mathbf{A}_c(t), \mathbf{g}(t))\Delta t, \qquad (8)$$

где t – дискретный момент времени; $\Re(t)$, $\mathbf{E}(t)$, $\mathbf{A}_c(t)$ – соответствующие функции дискретного времени $t = t_0, t_0+1, t_0+2, \ldots$; t_0 — выбранный начальный момент времени.

В случае дискретных действий $\mathbf{A}_c(t)$ эволюцию состояния системы «группа роботов − среда» можно описать с помощью системы разностных уравнений

$$\mathbf{S}_c(t+1) = \mathbf{f}(\mathbf{S}_c(t), \mathbf{A}_c(t), \mathbf{g}(t)), \quad t = t_0, t_0+1, t_0+2, \ldots. \qquad (9)$$

В соответствии с приведенными выше принципами коллективного управления при определении оптимального группового управления в качестве начальных условий t_0, $\mathbf{S}_c^0$, $\mathbf{g}^0$ следует принимать значения $\mathbf{S}_c(\hat{t})$ и $\mathbf{g}(\hat{t})$ в текущий момент времени, т.е.

$$t_0 = \hat{t}, \quad \mathbf{S}_c^0(t_0) = \mathbf{S}_c(\hat{t}), \quad \mathbf{g}^0 = \mathbf{g}(t_0) = \mathbf{g}(\hat{t}). \qquad (10)$$

Кроме того, на действия роботов, их состояния и состояния системы «группа роботов − среда» накладываются ограничения вида

$$\mathbf{A}_c(t) \in \{\mathbf{A}_c^p(t)\}, \quad t = t_0, t_0+1, t_0+2, \ldots. \qquad (11)$$

Тогда задачу группового управления роботами можно решать как задачу оптимального управления системой с дискретным временем.

3. Взаимная локализация роботов в рабочем пространстве

При функционировании в группе робот должен постоянно воспринимать информацию о своей локализации в рабочей зоне, и взаимной локализации, т. е. локализации по отношению к другим роботам группы. Именно взаимная локализация дает возможность роботу выбрать оптимальные действия при достижении групповой цели с учетом действий других роботов группы.

Предположим, что поза робота определяется двумя декартовыми координатами: x и y, а также его угловым направлением θ. Если эти значения представить в виде вектора, то любое состояние робота можно будет описать в виде:

$$\mathbf{X}_t = (x_t, y_t, \theta_t)^T \qquad (12)$$

Каждое действие робота состоит из «мгновенной» спецификации двух скоростей: скорости переноса v_t и скорости вращения ω_t. Таким образом, грубая модель движения робота задаётся следующим выражением:

$$\mathbf{X}_{t+1} = f(\mathbf{X}_t, \underbrace{v_t, \omega_t}_{a_t}) = \mathbf{X}_t + \begin{pmatrix} v_t \Delta t \cos\theta_t \\ v_t \Delta t \sin\theta_t \\ \omega_t \Delta t \end{pmatrix}. \qquad (13)$$

Поведение физических роботов является плохо предсказуемым. Обычно это моделируется гауссовым распределением со средним $f(\mathbf{X}_t, v_t, \omega_t)$ и ковариацией Σ_x

$$\mathbf{P}(\mathbf{X}_{t+1} \mid \mathbf{X}_t, v_t, \omega_t) = N(\mathbf{X}_{t+1}, \Sigma_x). \qquad (14)$$

Можно использовать два типа модели восприятия роботом окружающей среды. В первой из них предполагается, что датчики обнаруживают стабильные, различимые характеристики среды, называемые метками. Для каждой метки они сообщают дальность и азимут. Состояние робота определяется выражением $\mathbf{X}_t = (x_t, y_t, \theta_t)^T$ и он принимает информацию о метке, местонахождение которой, как известно, определяется координатами $(x_i, y_i)^T$. При наличии шума точное предсказание наблюдаемых значений дальности и азимута может быть выполнено с помощью следующей формулы:

$$\hat{\mathbf{z}}_t = h(\mathbf{x}_t) = \begin{pmatrix} \sqrt{(x_t - x_i)^2 + (y_t - y_i)^2} \\ \arctan \dfrac{y_i - y_t}{x_i - x_t} - \theta_t \end{pmatrix}. \qquad (15)$$

Если учесть наличие гауссова шума с ковариацией Σ_x, получим:

$$P(\mathbf{z}_t \mid \mathbf{x}_t) = N(\hat{\mathbf{z}}_t, \Sigma_z). \qquad (16)$$

В случае, если предполагается отсутствие меток, однако используется дальномер, более приемлемой является другая модель восприятия. Датчики вырабатывают вектор значений дальности $\mathbf{z}_t = (z_1, \ldots, z_M)^T$, в каждом из которых азимуты являются фиксированными по отношению к роботу. При условии, что дана поза $\mathbf{x}_t$, допустим, что z_j − точное расстояние вдоль направления j-го луча от $\mathbf{x}_t$ до ближайшего препятствия. Как правило, предполагается, что погрешности для различных направлений лучей независимы и заданы в виде идентичных распределений, поэтому имеет место следующая формула:

$$P(\mathbf{z}_t \mid \mathbf{x}_t) = \alpha \prod_{j=1}^{M} e^{-\frac{z_j - \hat{z}_j}{2\sigma^2}}. \qquad (17)$$

Сравнивая модель измерения дальностей с моделью отметок, можно убедиться, что модель измерения дальностей обладает преимуществом, т.к. не требует идентификации метки для получения возможности интерпретировать результаты измерения дальностей. С другой стороны, если бы перед ним была видимая, четко идентифицируемая метка, то робот мог бы обеспечить немедленную локализацию.

4. Реализация групповой работы в среде футбола роботов

Рассмотрим как могут быть реализованы изложенный подход к выбору оптимальных действий роботов с учетом их взаимной локализации на примере футбола роботов. В этом случае реализация групповой работы роботов усложняется в том плане, что роботы объединены в две противоборствующие команды (A и B) и взаимная локализация роботов не является статичной − на поле находятся много движущихся роботов и окружение каждого робота будет изменяться [1].

При разработке групповой (командной) стратегии игры нужно учесть, что управление должно быть принципиально децентрализованным и каналы связи не надежны. Поэтому роботы команды должны работать полностью автономно и в условиях ограниченной связи между собой.

В каждой команде должны быть определены роли игроков: вратаря, защитника, нападающего. Задача робота-вратаря состоит в том, чтобы не допустить попадание мяча в свои ворота и не покидать зону ворот. Робот-защитник должен перехватывать мяч и направлять его в сторону ворот противника. Робот-нападающий должен стараться забить гол в ворота противника.

Для координации действий роботов-игроков предлагается использовать короткие сообщения, в которых они могут передавать друг другу просьбы о том, что им требуется та или иная помощь, но не будут ожидать их беспрекословного исполнения. В случае если «просьба» была выполнена, роботы будут получать об этом уведомление для внесения корректировок в свое поведение.

Рассмотрим как решаются ключевые задачи управления командной работой роботов-игроков – реализация тактики команды и формирование коллективного и индивидуального поведения – на примере робота Nao фирмы Aldebaran Robotics, который используется разными командами как робот-футболист в Стандартной гуманоидной лиге футбола роботов RoboCup [2].

В общем случае тактика игры команды определяется текущим состоянием системы «игроки – мяч», граф состояния которой показан на рис. 2. Первоначальные действия игроков направлены на размещение в своей зоне поля до того, как будет подан сигнал о начале игры. Момент начала игры определяется вбрасыванием мяча и обозначен как «start». Состояние «мяч свободен» соответствует моменту времени, когда в непосредственной близости от мяча нет ни одного игрока ни одной из команд. Тактика команды в этом случае заключается в организации захвата мяча прежде, чем это сделает противник. Состояние «мяч в воротах противника» возникает, когда мяч пересекает линию ворот противника, а состояние «мяч в своих воротах» определяется ситуацией, когда гол забивает противник. В этих случаях игра приостанавливается, и роботы-игроки обеих команд должны отойти в свои зоны и занять позиции для «розыгрыша» мяча. Тактика команды в этих ситуациях аналогична тактике после вбрасывания мяча. После того, как роботы-игроки обеих команд займут позиции в своих зонах, команда, пропустившая гол, разыгрывает мяч. Состояние «мяч у игроков противника» определяется ситуацией, когда один из роботов-игроков противника владеет мячом, т. е. находится в непосредственной близости к нему или выполняет удар по мячу. Тактика команды – организация перехвата мяча у противника или создание помех перемещениям роботов-игроков команды противника, а также защита своих ворот. Состояние «мяч у своих игроков» возникает, когда один из роботов-игроков своей команды находится в непосредственной близости к мячу либо выполняет пас или удар по воротам противника. Тактика команды – организация атаки ворот противника. Для этого роботы-игроки перемещаются к воротам противника, занимая наиболее выгодные позиции для паса и удара по воротам противника.

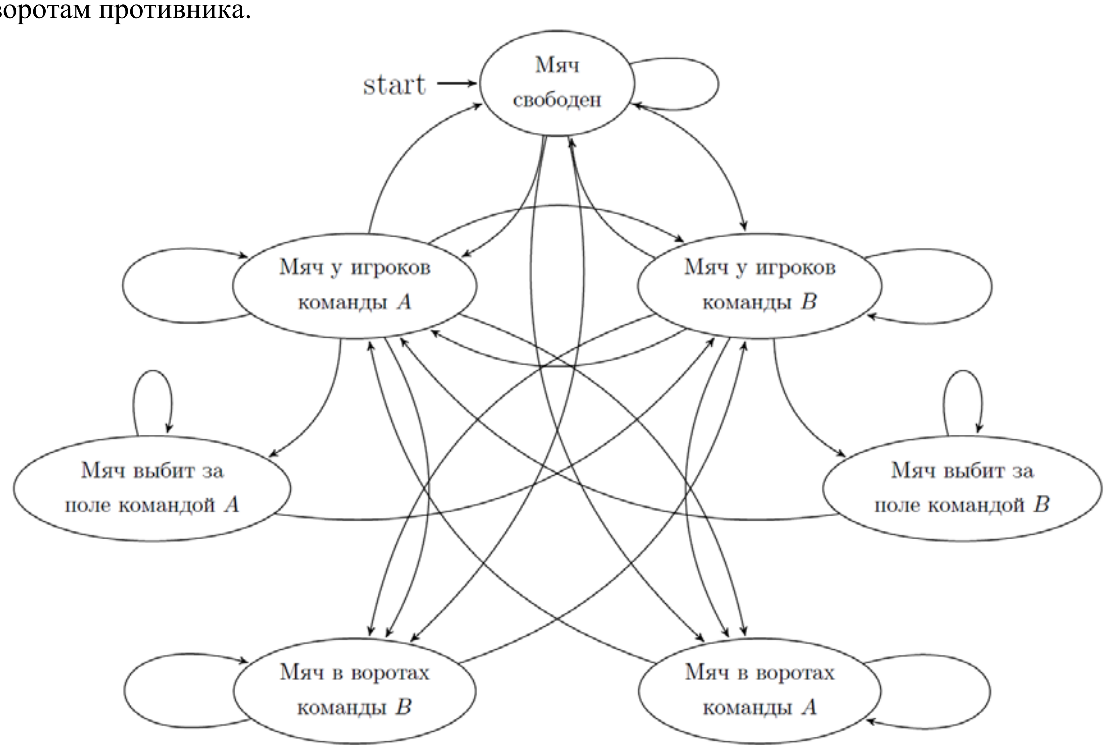


Рис. 2. Граф состояний системы

Для выполнения командной работы каждый робот-футболист должен иметь модель окружения, в которой имеется представление о локализации мяча и взаимной локализации других игроков. Модель должна быть динамической, т. е. фиксирующей изменения положения объектов окружения во времени и прогнозирующей их траекторные перемещения [3]. Для ее формирования в системе управления робота Nao требуется решать задачи, такие как распознавание ворот, других роботов и мяча.

При распознавании ворот, учитывая, что робот всегда находится в вертикальном положении, их определение можно свести к поиску двух вертикальных линий и одной относительно горизонтальной с возможным наклоном в пределах до 45° с использованием алгоритма Хафа.

Распознавание других роботов – более сложная задача, нежели поиск простых геометрических форм. Здесь можно использовать признаки Хаара, часто применяемые для распознавания лиц.

В стандартной системе NAOqi реализован способ нахождения красного мяча ALRedBallDetection, который основан на распознавании красных пикселей, попадающих в поле зрения камеры робота, и определении места их скопления в форме круга, которое и считается мячом.

В авторском исполнении программа управления поведением робота-футболиста была разработана в среде Qt Creator на языке C++ с использованием библиотеки OpenCV и специально разработанных поведенческих модулей. Эта программа будет использована для управления роботом Nao в команде Санкт-Петербургского политехнического университета в соревнованиях RoboCup.

1. Л.А. Станкевич, Е.И. Юревич. Искусственный интеллект и искусственный разум в робототехнике. Учеб. пособие. СПб. Изд-во Политехнического университета, 2012, 167 с.
2. Описание лиги роботов-футболистов на основе стандартизированных платформ. http://wiki.robocup.org/wiki/Standard_Platform_League.
3. Клочков И.В., Мангутов О.В., Станкевич Л.А. Трехмерное восприятие и навигационное поведение мобильного робота. Материалы XVI Международная конференция по нейрокибернетике (24-28 сентября 2012 г.), Изд-во ЮФУ, Ростов-на-Дону, 2012, с. 97-99

S.H. Zabihifar, A.S. Yuschenko

CONTROL OF MANIPULATOR WITH FUZZY SLIDING MODE APPROACH

Bauman MSTU, Moscow, Russia

robot@bmstu.ru

Introduction

At the solution of a number of the complex manipulating issues it is expediently to use the fuzzy logic reproducing the human-operator's experience. In particular, it is possible to carry control of large manipulators of space base, and land handling systems applied in building, at elimination of accidents consequences. For similar manipulating systems the control becomes complicated due to the composite and non-linear dynamics of a design which, besides, can be not completely described. The advantage of fuzzy logic to solving these types of issues is that rules of control do not depend on object's numerical scheme. However in process of object's dynamics complication the number of such rules significantly increases. In this regard the new approach based on application of the sliding modewhich, in its turn, is formed by means of the fuzzy controller has recentlydeveloped. Thus, on the one hand, experience of the operator is used. But on the other hand, the mathematical description of the system working in the sliding mode becomes simpler.

The controlling method of sliding type with use of fuzzy logic was considered in a number of works [1] - [6]. This method called Adaptive Fuzzy Sliding-mode Control (AFSMC) represents a combination of fuzzy logic controlling and controlling in the sliding mode. In comparison with immediate application of fuzzy logic methods this method has the advantage.The number of productional rules reduces, because the input variable defines only one condition – proximity of a system's condition to a sliding surface. Unlike traditional methods of controlling with application of the sliding modes there is no precise description of the controlled device. Conditions of state vector's reduction to a sliding surface and its deduction on this surface are provided by means of fuzzy logic's rules. The main advantage of the sliding mode is that it provides independence of controlling process, both from external influences, and parametrical disturbances.

The statement of a problem

Generally the algorithm of AFSMC is considered for MIMO affine non-linear systems described by system of differential equations

$$\begin{bmatrix} y_1^{(r1)} \\ \vdots \\ y_m^{(r_m)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1\ (x) \\ \vdots \\ f_m(x) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} g_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & g_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ \vdots \\ u_m \end{bmatrix} \quad \textbf{(1)}$$

or

$$y^{(r)} = F(x) + Gu, \quad \textbf{(2)}$$

where $y = [y_1, ,..., y_m]^T$ and $y^r = [y_1^{r_1}, ..., y_m^{r_m}]^T$ is an output vector and its derivative respectively. Here $X = [y_1, \dot{y}_1, ..., y_1^{(r_1-1)}, ..., y_m, \dot{y}_m, ..., y_m^{(r_m-1)}]^T$ is a state vector which, as it is supposed, ispossible to be measured. Besides, $u = [u_1, ,..., u_m]^T$ is a vector of controlling signals, $F(x) = [f_1(x), ..., f_m(x)]^T$ is the vector of smooth and probably unknown function of x . Components of G scalar matrix are unknown constants. Relative degree of system (2) is equal to $r_1 + r_2 + ... + r_m = n$ .Involving parametrical indeterminacy in a right part (2) equation of system has to be modified as follows:

$$y^{(r)} = F(X) + Gu + d \quad (3)$$

Where $d = [d_1, ..., d_m]^T$ is an unknown vector which components are limited.

$$|d_i| < \delta_i \quad (4)$$

Let the y vector's change trajectory in time $y_d = [y_{d1}, ,..., y_{dm}]^T$ be set. It is required to formulate the controlling law *u*so that the $\tilde{y} = y_d - y$ error vector in a norm asymptotically converges to zero.

Control method

The design of sliding control mode includes two stages: the first step isto design a sliding surface $s(x)$ to represent the desired system dynamics, which is of lower order than the given plant. The second step is to design a variable structure control u such that any state outside the switching surface is driven to reach the surface in finite time. On the sliding surface, the sliding mode takes place, following the desired system dynamics. In this way, the stability of trajectory on s is guaranteed.

Let's define m sliding surfaces as

$$S = \lambda \tilde{Y} = [s_1, ..., s_m]^T \quad (5)$$

where $s_i = \lambda_i^T \tilde{y}_i$, $\lambda_i = [\lambda_{i1}, .., \lambda_{i\,(r_i-1)}, 1]^T$ is the vector of Hurwitz coefficients, $\tilde{Y}_i = [\tilde{y}_i, \ldots, \tilde{y}_i^{(r_i-1)}]^T$ is the tracking error-vector.

Differentiating the equations of sliding surfaces with respect to time, we get

$$\dot{s}_i = \sum_{j=1}^{r_i} \lambda_{ij} \tilde{y}_i^j = E_{\lambda_i} + y_{d_i}^{r_i} - f_i(x) - g_{ii} u_i - d_i, \quad (6)$$

$$E_{\lambda_i} = \sum_{j=1}^{r_i-1} \lambda_{ij} \tilde{y}_i^j \quad (7)$$

Control function in the sliding mode is defined as

$$u = u^{eq} + u^r, \quad (8)$$

where u^{eq} is defined out of criterion s=0, taking into account (5)

$$\dot{s}_i = E_{\lambda i} + y_{di}^{(r_i)} - f_i(x) - g_{ii} u_i^{eq} = 0$$

$$\Rightarrow u_i^{eq} = \left(\frac{1}{g_{ii}} \right) \left(E_{\lambda i} + y_{di}^{(r_i)} - f_i(x) \right) \quad (9)$$

Robust control u^{rb} , which is used for overcoming of system's indeterminacy, is defined as $u^{rb} = G^{-1} v$, where $v_i = \delta_i \operatorname{sgn}(s_i) \Rightarrow v = [\Delta \operatorname{sgn}(S)]^T$. By taking into account (6) – (9), we get:

$$\dot{s}_i = E_{\lambda_i} + y_{d_i}^{(r_i)} - f_i(x) + (E_{\lambda_i} + y_{d_i}^{(r_i)} - f_i(x) + v_i) - d_i = -d_i - \delta_i \operatorname{sgn}(s_i) \quad (10)$$

Defining Lyapunov function as

$$L_i = \frac{1}{2} s_i^2 , \quad (11)$$

we calculate its time derivative; taking into account (4), (10) we get

$$\dot{L}_i = s_i \dot{s}_i = -s_i d_i - |s_i| \delta_i \le |s_i||d_i| - |s_i| \delta_i$$
$$= -|s_i| (\delta_i - |d_i|) \le 0 \quad (12)$$

Thus, according to Lyapunov the sliding control mode (9) guarantees stability of a system (2).

The fuzzy controller in AFSMC structure

The fuzzy logic in the considered task is used to provide convergence of trajectories to the sliding surface in the criterion of indeterminacy. Let's consider Takagi-Sugeno's algorithm for indeterminate system which input is the description of subsystem's sliding surface. The system has the only output u_k^{fuz} and n_r fuzzy rules that look like :

<if s_k is A_k^r, then $u_k^{fuz} = b_k^r,\ r = 1,\ldots,n_r$ >,

where b_k^r is a fuzzy singleton for the output of *r*-th rules. Fuzzy multitude A_k^r is characterized by Gaussian membership function.

$$\mu_{A_k^r}(s_k) = \exp\left[-\left(\frac{s_k - c_k^r}{\sigma_k^r} \right)^2 \right]$$

Defuzzification is made according to the formula which defines a controlling signal.

$$u_k^{fuz}(s_k, b_k) = b_k^T w_k , \quad \textbf{(13)}$$

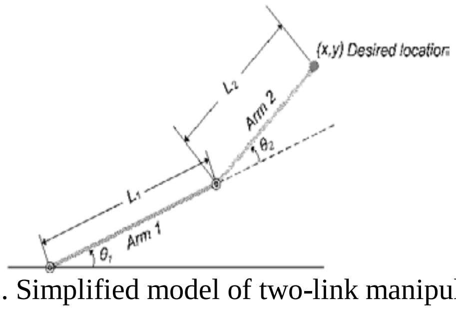
where indicated $w_k = \left[w_k^1, \ldots, w_k^{n_r} \right]^T, b_k = \left[b_k^1, \ldots, b_k^{n_r} \right]^T$. Coefficients

$$w_k^r = \frac{\mu_{A_k^r}(s_k)}{\sum_{r=1}^{n_r} \mu_{A_k^r}(s_k)}, \qquad r = 1,\ldots,n_r ,$$

determine a"force of the *r*-rule". It can be proved that the system provides an asymptotic stability of the sliding mode at rather common assumptions.

Manipulator controlling simulation through AFSMC

In order to investigate the crucial possibilities of application of manipulator's controlling method with compensation of dynamic and parametrical disturbances, we will consider an issue of controlling of the two-link manipulator in the surface (Pic. 1). Thus we will consider links plugs, and we will assign hinges to ideal kinematic couples of the 5th class. In this case it is easy to execute model both the offered way controlling and traditional controlling with a rigid feed-back without compensation of dynamic disturbances of the model to find out the effectiveness of the offered method.



Pic1. Simplified model of two-link manipulator

Links of the manipulator have length of L1 and L2. Their masses are respectively denoted by M1 and M2. Let $\theta 1$ and $\theta 2$ denote the angles of the relative movements of the links, then The equations of the end point of the first and second links are defined as

$$x_1 = L_1 \cos\theta_1 \quad , \quad y_1 = L_1 \sin\theta_1$$

$$x_2 = L_1 \cos\theta_1 + L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \quad , \quad y_2 = L_1 \sin\theta_1 + L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) .$$

Suppose $0 < \theta 1 < \frac{\pi}{2}$, $-\pi < \theta 2 < 0$. Using Euler Lagrange equations, we get differential equations of a torque link.

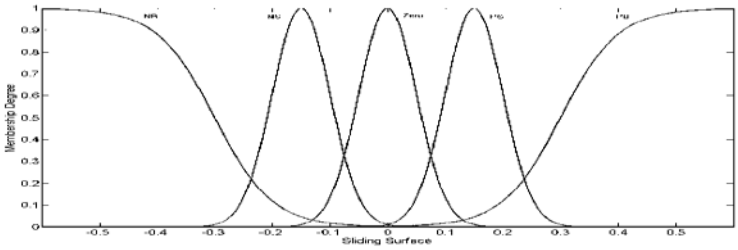
$$(M_1 + M_2)L_1^2\ddot{\theta}_1 + M_2L_1L_2\ddot{\theta}_2 \cos(\theta_1 - \theta_2) + M_2L_1L_2\dot{\theta}_2^2 \sin(\theta_1 - \theta_2) + (M_1 + M_2)gL_1 \cos\theta_1 = \mathrm{T}_{\theta_1}$$
$$M_2L_2^2\ddot{\theta}_2 + M_2L_1L_2\ddot{\theta}_1 \cos(\theta_1 - \theta_2) - M_2L_1L_2\dot{\theta}_1^2 \sin(\theta_1 - \theta_2) + M_2gL_2 \cos\theta_2 = \mathrm{T}_{\theta_2} \quad (14)$$

where T is a rotation moment.

Now we determine parameters $\lambda_{11}, \lambda_{21}, \alpha_1, \alpha_2$ for the controller of each degree of freedom. Coefficients define **sliding** surfaces according to the equation (5). The fuzzy component of controlling is defined from the equation (13), and the components providing the sliding mode in the conditions of indeterminacy – from the equations (8), (9).

Using means of controlling processes optimization, MATLAB Simulink package (Response optimization tools), values of these parameters were chosen. For the first link they are λ_{11} = 0,0629, λ_{21} = 0,0246, α_1 = 10000, α_2 = 3000, , and for the second they are λ_{11} =0.0640, λ_{21} =0.0224, α_1 =10000, α_2 =300.

Membership functions, characterizing distance to a sliding surface are given in pic.2

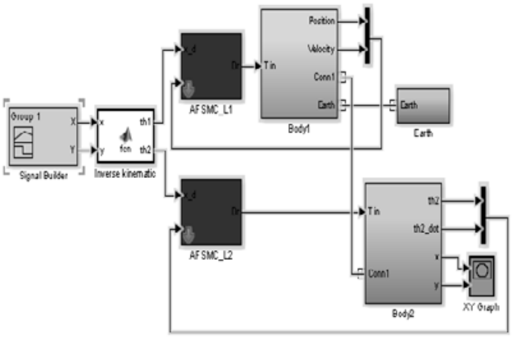


Pic.2. Membership functions

Toinvestigate the considered manipulator control system the SimMechanics package was used(Pic. 3). Links of the manipulator have the following characteristics: length of the first link is 0,5 m, the second – 0,25m, diameter of the rods is 0,03 m, density of the first link is 800 kg/m3, the second - 400 kg/m3.

Model operation of the manipulator dynamics was carried out according to the equations (14).

Generalized scheme of model operation is given on Pic.3.

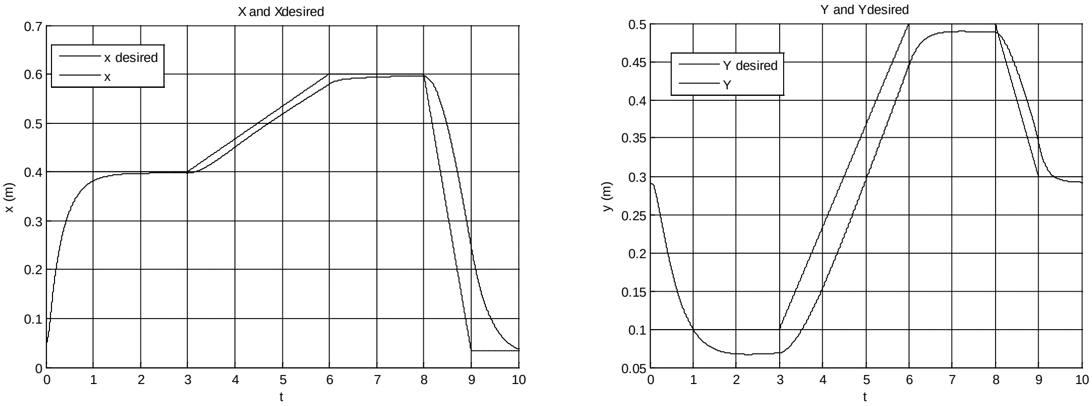


Pic.3. The model operation scheme of robot and controllers in a Simulink package

Functions X (t) and Y(t) corresponding to the given law of gripper's motion (a terminal point of a kinematic chain) of the manipulator in Cartesian coordinate system are shown in fig. 4. On the same graphic charts we got the results received when using the AFSMC controller.

The control signals analysis at the output of fuzzy controllers showed that in the case under consideration practically there are no vibrations caused by a switching effect in the vicinity of the sliding surface.

Experimentally it was also shown that the system successfully functions even in the case of net-load. Stability of the sliding mode is not broken (during the experiment loading was increased to 500 g). Thus, successful functioning of the system at parametrical disturbances is ensured. The vibrations arising due to switching in the vicinity of the sliding mode have no essential impact on the results.



Pic. 4.Comparison of the command and response of coordinates' change of X, Y with AFSMC law

Conclusion

The manipulator controller made with use of the AFSM method allows providing the controlling of a non-linear system in the sliding mode. Thus the mathematical model of the controlled object is not used and it provides a resistance of system to parametrical perturbations. Use of fuzzy logic allows overcoming vibrations, bound to switching in the vicinity of a sliding surface. It is possible to hope that the AFSM method will find its usage at control of manipulators with crucial dynamic interference of links in the presence of essential parametrical disturbances.

1 Rong-Jong Wai, Chih-Min Lin "Adaptive fuzzy sliding-mode control for electrical servo drive", Fuzzy Sets and Systems 143, pp. 295-310, 2004.

2 A. Ishingame, T. Furukawa, S. Kawamoto and T. Taniguchi, "Sliding Mode Controller Design Based on Fuzzy Inference for Nonlinear Systems", IEEE Trans. Ind. Electro., Vol. 40, pp. 64-70, Feb. 1993.

3 M. Roopaei and M. ZolghadriJahromi, "Chattering-Free Fuzzy Sliding Mode Control in MIMO Uncertain Systems", Nonlinear Analysis, Vol. 71, pp. 4430-4437, Nov. 2009.

4 C.M. Lin, T.Y. Chen, W.Z. Fan and Y.F. Lee, "Adaptive Fuzzy Sliding Mode Control for a Two-Link Robot", IEEE Int. Conf. Robotics and Biomimetics, pp. 581-586, 2005.

5 A. Poursamad and A.H.D. Markazi, "Adaptive Fuzzy Sliding Mode Control for Multi-Input Multi-Output Chaotic Systems", Chaos, Solitons and Fractals, Vol. 42, No. 5, pp. 3100–3109, Dec. 2009.

6 J.Wang,,C., Wang, B.Feng, , Y.Sun, and J.Liu, , "Robust adaptive fuzzy sliding mode control of PM synchronous servo motor", Proceedings of 2010 Chinese Control and Decision Conference, pp. 3419–3422, 2010.

С.Х. Забихифар, А.С. Ющенко

УПРАВЛЕНИЕ МАНИПУЛЯТОРОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЧЕТКОГО УПРАВЛЕНИЯ СКОЛЬЗЯЩЕГО ТИПА

Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана, Москва
robot@bmstu.ru

Введение

При решении ряда сложных манипуляционных задач целесообразно применение нечеткой логики, воспроизводящей опыт человека-оператора. К таким задачам, в частности, можно отнести управление крупными манипуляторами космического базирования, а также наземными манипуляционными системами, применяемыми в строительстве, при ликвидации последствий аварий и катастроф. Для подобных манипуляционных систем управление усложняется за счет сложной и нелинейной динамики конструкции, которая, к тому же может быть не полностью описана. Преимущество применения нечеткой логики для таких задач состоит в том, что правила управления не зависят от математической модели объекта. Однако по мере усложнения динамики объекта число таких правил существенно возрастает. В связи с этим в последнее время получил развитие новый подход, основанный на применении скользящего режима, который, в свою очередь, формируется с помощью нечеткого контроллера. При этом, с одной стороны, используется опыт оператора, а с другой, упрощается математическое описание системы, работающей в скользящем режиме.

Метод управления скользящего типа с использованием нечеткой логики рассматривался в ряде работ. Этот метод, получивший название Adaptive Fuzzy Sliding-mode Control (AFSMC) представляет собой сочетание нечеткого управления и управления в скользящем режиме. По сравнению с непосредственным применением методов нечеткой логики этот метод обладает тем преимуществом, что сокращается число продукционных правил, так как входная переменная определяет только одно условие – близость состояния системы к поверхности скольжения. В отличие от традиционных методов управления с применением скользящих режимов здесь не предполагается точного описания управляемого объекта. Условия приведения вектора состояния к поверхности скольжения и удержания его на этой поверхности обеспечиваются за счет правил нечеткой логики. Основное преимущество скользящего режима заключается в том, что он обеспечивает независимость процесса управления, как от внешних воздействий, так и от параметрических возмущений.

Постановка задачи

В общем случае алгоритм AFSMC рассматриваетсядля MIMO аффинных нелинейных систем, описываемых системой дифференциальных уравнений

$$\begin{bmatrix} y_1^{(r1)} \\ \vdots \\ y_m^{(r_m)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1(x) \\ \vdots \\ f_m(x) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} g_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & g_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ \vdots \\ u_m \end{bmatrix} \tag{1}$$

или

$$y^{(r)} = F(x) + Gu \tag{2}$$

где $y = [y_1,,...,y_m]^T$ и $y^r = [y_1^{r_1},...,y_m^{r_m}]^T$ это вектор выходов и его производная соответственно. Здесь $X = [y_1, \dot{y}_1,..., y_1^{(r_1-1)},..., y_m, \dot{y}_m,..., y_m^{(r_m-1)}]^T$ является вектором состояний, который, как предполагается, можно измерить. Кроме того, $u = [u_1,,...,u_m]^T$ - вектор сигналов управления,

Ђ EMBED Equation. 3 ЂЂЂ

$F(x) = [\, f_1(x),..., f_m(x)]^T$ -это вектор, компонентамикоторого являются неизвестные функции от *x*. Компонентами диагональной матрицы *G*являются неизвестные постоянные. Порядок системы (2) равен $r_1 + r_2 + ... + r_m = n$.

При наличии параметрической неопределенности в правой части (2) уравнение системы должно быть модифицировано следующим образом:

$$y^{(r)} = F(X) + Gu + d \tag{3}$$

Здесь $d = \left[d_1,...,d_m\right]^T$ - неопределенный вектор, компоненты которого ограничены:

$$|d_i| < \delta_i \tag{4}$$

Пусть задана траекторияизменения вектора *y*во времени $y_d = [y_{d1},,...,y_{dm}]^T$. Требуется сформулировать закон управления *u*таким образом, чтобы вектор ошибки $\tilde{y} = y_d - y$ по норме асимптотически сходился к нулю.

Метод управления

Формирование скользящего режима управления включает в себя два этапа: первый состоит в разработке скользящей поверхности $s(x)$, которая представляет собой идеализированное описание динамики объекта управления и является существенно более простой по сравнению с истинной математической моделью объекта. Второй шаг заключается в формировании алгоритма управления u таким образом, чтобы при любом начальном состоянии обеспечивалось достижение поверхности переключения *S*за конечное время. На самой поверхности переключения выполняются уравнения скользящего процесса, соответствующего динамике идеализированного объекта управления. Таким образом, обеспечиваетсяустойчивость траектории движения объекта на поверхности *S*.

Определим *m*поверхностей скольжения как

$$S = \lambda \tilde{Y} = \left[s_1,...,s_m\right]^T \tag{5}$$

где $S = [s_1, \ldots s_m]^T, s_i = \lambda_i^T \tilde{y}_i$, и $\lambda_i = [\lambda_{i1}, .., \lambda_{i(r_i-1)}, 1]^T$ - вектор коэффициентов Гурвица, и $\tilde{Y}_i = [\tilde{y}_i, \ldots, \tilde{y}_i^{(r_i-1)}]^T$ - вектор ошибки.Дифференцируя по времени уравнения скользящей поверхности, получаем

$$\dot{s}_i = \sum_{j=1}^{r_i} \lambda_{ij} \tilde{y}_i^j = E_{\lambda_i} + y_{d_i}^{r_i} - f_i(x) - g_{ii} u_i - d_i \tag{6}$$

$$\text{где } E_{\lambda_i} = \sum_{j=1}^{r_i-1} \lambda_{ij} \tilde{y}_i^j \tag{7}$$

Управление в скользящем режиме определяется как

$$u = u^{eq} + u^r \tag{8}$$

где u^{eq}, определяется из условия $\dot{s} = 0$, то есть, с учетом (5)

$$\begin{aligned} &\dot{s}_i = E_{\lambda i} + y_{di}^{(r_i)} - f_i(x) - g_{ii} u_i^{eq} = 0 \\ &\Rightarrow u_i^{eq} = \left(\frac{1}{g_{ii}}\right)\left(E_{\lambda i} + y_{di}^{(r_i)} - f_i(x)\right) \end{aligned} \tag{9}$$

Робастное управление u^{rb}, которое используется для преодоления неопределенности системы, определяется как

$$u^{rb} = G^{-1} v$$

где $v_i = \delta_i \operatorname{sgn}(s_i) \Rightarrow v = \left[\Delta \operatorname{sgn}(S)\right]^T$ Сучетом (6) - (9) получим:

$$\dot{s}_i = E_{\lambda_i} + y_{d_i}^{(r_i)} - f_i(x) + (E_{\lambda_i} + y_{d_i}^{(r_i)} - f_i(x) + v_i) - d_i = -d_i - \delta_i \operatorname{sgn}(s_i) \tag{10}$$

Определяя функцию Ляпунова как

$$L_i = \frac{1}{2} s_i^2 \tag{11}$$

вычислим её производную по времени; с учетом получаем

$$\begin{aligned} \dot{L}_i &= s_i \dot{s}_i = -s_i d_i - |s_i| \delta_i \le |s_i||d_i| - |s_i| \delta_i \\ &= -|s_i| (\delta_i - |d_i|) \le 0 \end{aligned} \tag{12}$$

Таким образом, скользящий режим управления 0гарантируетустойчивость системы0 по Ляпунову.

Нечеткий контроллер в структуре AFSMC

Нечеткая логика в рассматриваемой задаче применяется для того, чтобы обеспечить сходимость траекторий к скользящей поверхности в условиях неопределенности.

Рассмотрим алгоритм Такаги-Сугено длянечеткой системы, входом которой является описание s_k поверхности скольжения k-й подсистемы.Система имеет один выход u_k^{fuz} и n_r нечетких правил в виде: <если S_k есть A_k^r, то $u_k^{fuz} = b_k^r$, $r = 1, \ldots, n_r$,>, где b_k^r нечеткийсинглтон для вывода r-го правила. Нечеткое множество A_k^r характеризуется гауссовой функцией принадлежности

$$\mu_{A_k^r}(s_k) = \exp\left[-\left(\frac{s_k - c_k^r}{\sigma_k^r}\right)^2\right]$$

Дефаззификация производится по формуле, которая и определяетсигнал управления:

$$u_k^{fuz}(s_k, b_k) = b_k^T w_k \tag{13}$$

где обозначено $w_k = \left[w_k^1, \ldots, w_k^{n_r}\right]^T, b_k = \left[b_k^1, \ldots, b_k^{n_r}\right]^T$

Коэффициенты $w_k^r = \dfrac{\mu_{A_k^r}(s_k)}{\sum_{r=1}^{n_r}\mu_{A_k^r}(s_k)}, \qquad r = 1,\dots,n_r,$

определяют «силу r-го правила».

Можно доказать, что система обеспечивает асимптотическую устойчивость скользящего режима при достаточно общих предположениях.

Моделирование управления манипулятором методом AFSMC

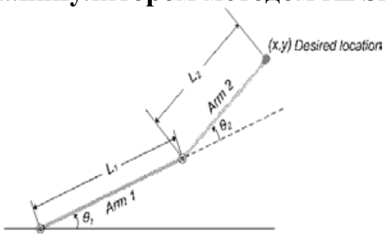


Рис. 1. Упрощенная модель двухзвенного манипулятора

Звенья манипулятора имеют длину L1 и L2. Их массы обозначены через M1 и M2 соответственно. Пусть θ1 и θ2 обозначают углы относительного перемещения звеньев, тогда координаты конечной точки первого и второго звеньев определяются как

$$x_1 = L_1\cos\theta_1 \quad , \quad y_1 = L_1\sin\theta_1 \; x_2 = L_1\cos\theta_1 + L_2\cos(\theta_1+\theta_2) \;\; y_2 = L_1\sin\theta_1 + L_2\sin(\theta_1+\theta_2) \;.$$

Положим также, что $0<\theta_1<\frac{\pi}{2}$, $-\pi<\theta_2<0$. Используя уравнения Эйлера-Лагранжа, получим уравнения дифференциальные уравнения двухзвенника:

$$(M_1+M_2)L_1^2\ddot{\theta}_1 + M_2L_1L_2\ddot{\theta}_2\cos(\theta_1-\theta_2) + M_2L_1L_2\dot{\theta}_2^2\sin(\theta_1-\theta_2) + (M_1+M_2)gL_1\cos\theta_1 = \mathrm{T}_{\theta_1}$$

$$M_2L_2^2\ddot{\theta}_2 + M_2L_1L_2\ddot{\theta}_1\cos(\theta_1-\theta_2) - M_2L_1L_2\dot{\theta}_1^2\sin(\theta_1-\theta_2) + M_2gL_2\cos\theta_2 = \mathrm{T}_{\theta_2} \tag{14}$$

где *T*- крутящий момент.

Определим теперь параметры $\lambda_{11}, \lambda_{21}, \alpha_1, \alpha_2$ для контроллеракаждой степени подвижности. Коэффициенты λ_{11}, λ_{21} определяют поверхности скольжения в соответствии с уравнением (5). Нечеткая составляющая управления определяется из уравнения (13),а составляющие, обеспечивающие скользящий режим в условиях неопределенности – из уравнений (8), (9) Используясредства оптимизации процессов управления пакета MATLABSimulink (Responseoptimizationtools), были выбраны значения этих параметров. Для первого звена они составили λ_{11}= 0,0629, λ_{21}= 0,0246, α_1= 10000, α_2= 3000, а для второго λ_{11}=0.0640, λ_{21}=0.0224, α_1=10000, α_2=300.

Функции принадлежности, характеризующие расстояние до поверхности скольжения, приведены на Рис.2

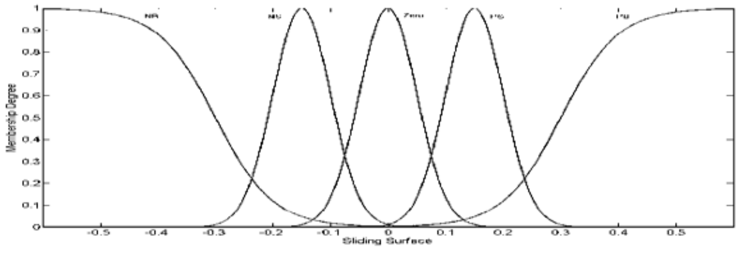


Рис.2. Функции принадлежности

Для моделирования рассмотренной выше системы управления манипуляторомиспользовался пакет SimMechanics (рис.3). Звенья манипулятора имеют следующие характеристики: длина первого звена 0,5 м, второго – 0,25м, диаметр стержней 0,03 м, плотность первого звена 800 кг/м^3, второго - 400кг/м^3.

Моделирование динамики манипулятора проводилось в соответствии с уравнениями (14) Обобщенная схема моделирования приведена на Рис. 3.

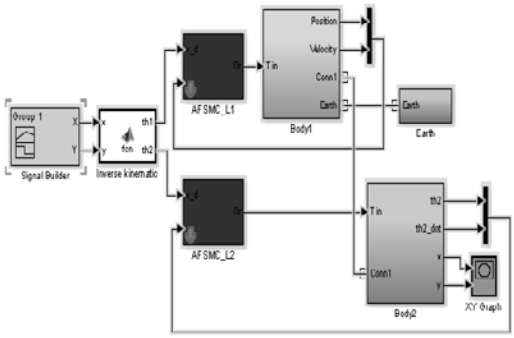


Рис. 3 Схема моделирования робота и контроллеров в пакете Simulink

На Рис.4 приведены функции$X(t)$ и $Y(t)$, соответствующие заданному закону движения схвата (конечной точки кинематической цепи) манипуляторав декартовой системе координат. На этих же графиках показаны результаты,полученные при использовании нечеткого контроллераAFSMC.

Анализ сигналов управленияна выходе нечетких контроллеров показал, что в рассматриваемом случае практически отсутствуют вибрации, обусловленные эффектом переключения в окрестности скользящей поверхности.

Экспериментально также было показано, что система успешно функционирует и при наличии полезной нагрузки. Устойчивость скользящего режима не нарушается (в эксперименте нагрузка увеличивалась до 500 г). Таким образом, обеспечивается и успешная работа системы при параметрических возмущениях. При этом вибрации, возникающие за счет переключений в окрестности скользящего режима, не оказывают существенного влияния на получаемые результаты.

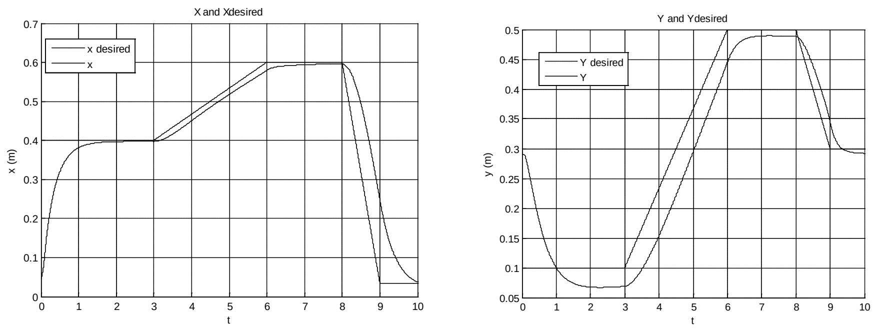


Рис.4. Сравнение заданного закона изменения координат X, Y
и полученного при использовании метода AFSMC

Заключение

Контроллер манипулятора, выполненный с использованием метода AFSM, позволяетобеспечивать управление нелинейной системой в скользящем режиме. При этом не используется математическая модель объекта управления и обеспечивается устойчивость системы к параметрическим возмущениям. Использование нечеткой логики позволяет преодолеть вибрации, связанные с переключениями в окрестности поверхности скольжения. Таким образом, можно надеяться, что метод AFSM найдет применение при управлении манипуляторами с существенным динамическим взаимовлиянием звеньев и при наличии существенных параметрических возмущений.

4. Rong-Jong Wai, Chih-Min Lin "Adaptive fuzzy sliding-mode control for electrical servo drive", Fuzzy Sets and Systems 143, pp. 295-310, 2004.

5. A. Ishingame, T. Furukawa, S. Kawamoto and T. Taniguchi, “Sliding Mode Controller Design Based on Fuzzy Inference for Nonlinear Systems”, IEEE Trans. Ind. Electro., Vol. 40, pp. 64-70, Feb. 1993.
6. M. Roopaei and M. ZolghadriJahromi, “Chattering-Free Fuzzy Sliding Mode Control in MIMO Uncertain Systems”, Nonlinear Analysis, Vol. 71, pp. 4430-4437, Nov. 2009.
7. C.M. Lin, T.Y. Chen, W.Z. Fan and Y.F. Lee, “Adaptive Fuzzy Sliding Mode Control for a Two-Link Robot”, IEEE Int. Conf. Robotics and Biomimetics, pp. 581-586, 2005.
8. A. Poursamad and A.H.D. Markazi, “Adaptive Fuzzy Sliding Mode Control for Multi-Input Multi-Output Chaotic Systems”, Chaos, Solitons and Fractals, Vol. 42, No. 5, pp. 3100–3109, Dec. 2009.
9. J.Wang,,C., Wang, B.Feng, , Y.Sun, and J.Liu, , “Robust adaptive fuzzy sliding mode control of PM synchronous servo motor”, Proceedings of 2010 Chinese Control and Decision Conference, pp. 3419–3422, 2010.

A. Leonard, E. Briskin

CONTROL WITH TIME DELAY OF WALKING MACHINE "CYCLONE" IN THE SUPPORT PHASE

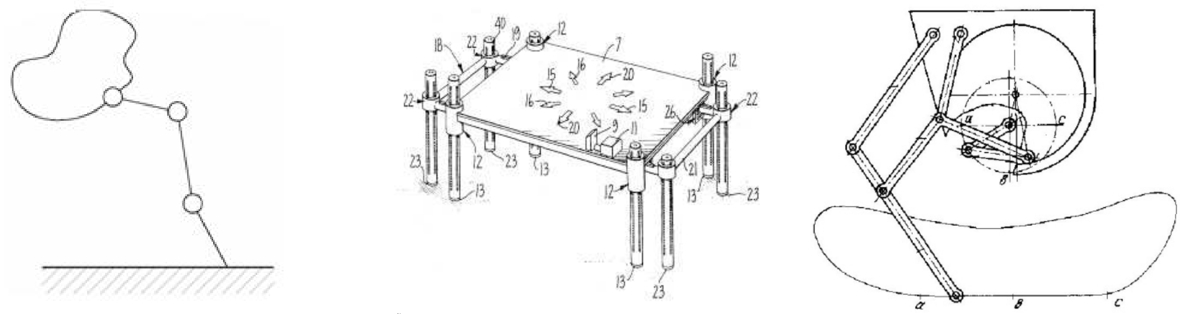
Volgograd State Technical University, Russia
dtm@vstu.ru, Alex-Leonard@yandex.ru

А.В. Леонард, Е.С. Брискин

УПРАВЛЕНИЕ С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ ШАГАЮЩЕГО АППАРАТА "ЦИКЛОН" В ФАЗЕ ОПОРЫ*

Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград
dtm@vstu.ru, Alex-Leonard@yandex.ru

Существуют различные условия передвижения транспортных средств специального назначения. В частности, такими условиями может быть сильно пересеченная местность (естественные и техногенные преграды) с низкой несущей способностью (заболоченная местность). Передвижение в подобных условиях будет эффективным в случае применения шагающих движителей. Поэтому актуальным является исследование транспортных средств с шагающим принципом перемещения [1]. Существует несколько типов шагающих движителей, отличающихся друг от друга числом и видом управляемых степеней подвижности: в виде разомкнутых кинематических цепей, ортогональные, цикловые и др. (Рис. 1).



а) б) в)

Рис. 1. Виды шагающих движителей:
а) разомкнутая кинематическая цепь; б) ортогональный; в) цикловой

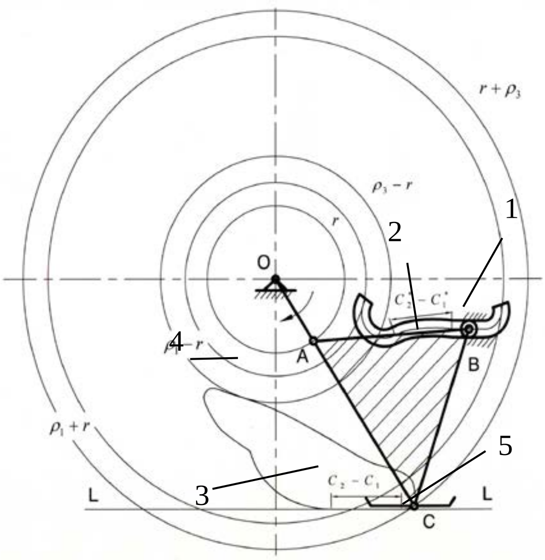
В качестве исследуемого типа движителя был выбран цикловый тип, так как при реализации шагающего принципа передвижения задействуется один двигатель на один шагающий механизм, что упрощает управление. Но реализация прямолинейной опорной фазы (для энергетически эффективного движения) сопряжено с увеличением количества звеньев, что является само по себе негативным явлением (уменьшается надежность, увеличивается неуравновешенность механизма). Предлагается альтернатива в виде механизма с направляющей (Рис. 2) [2]: 1 — направляющая; 2 — ролик; 3 —

* Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 14-08-31214, № 14-08-01002) и МИНОБРНАУКИ (проект № 862)

шатун; 4 — кривошип; 5 — стопа; 6 — аккумулятор; 7 — электрический двигатель постоянного тока; 8 — рама.

Повышенной жесткости конструкции можно добиться путем дублирования соответствующих звеньев механизма, а улучшить адаптивные свойства – установкой приводов адаптации стоп [3].

Для исследования вопроса управления транспортным средством со сдвоенными механизмами шагания рассматривается шагающий аппарат "Циклон", который представляет собой колесную раму с одним цикловым движителем [4].



[1]

[2]
[3]

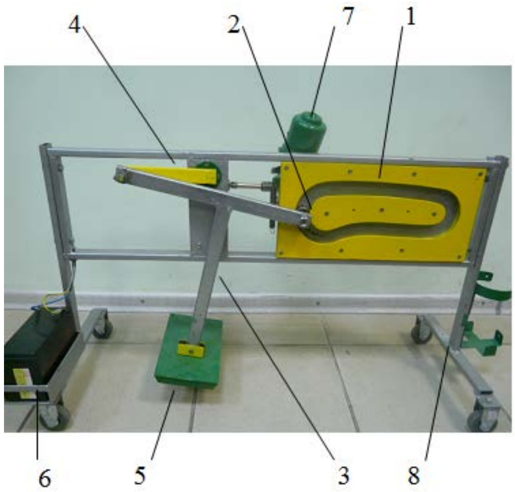


Рис. 2. Цикловой шагающий механизм с направляющей

Повышенной жесткости конструкции можно добиться путем дублирования соответствующих звеньев механизма, а улучшить адаптивные свойства – установкой приводов адаптации стоп [3].

Для исследования вопроса управления транспортным средством со сдвоенными механизмами шагания рассматривается шагающий аппарат "Циклон", который представляет собой колесную раму с одним цикловым движителем [4].

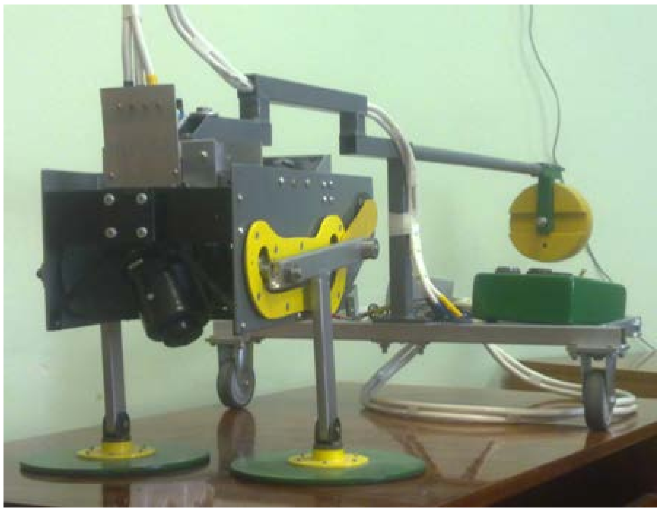


Рис. 3. Шагающий аппарат "Циклон"

Реализация согласованного (энергетически эффективного) управления сдвоенных механизмов шагания в фазе опоры и переноса требуют точного позиционирования ведущих кривошипов и отработки не линейных законов изменения угловых координат [5], что достигается с применением цифровой системы управления.

При прямолинейном движении характерной точки корпуса, шагающий аппарат можно представить в виде механической системы с двумя степенями свободы. При этом движение в фазе опоры описывается нелинейным уравнением вида:

$$a_2(\varphi)\ddot{\varphi}+a_1(\varphi)\dot{\varphi}^2=\gamma_1 U-\gamma_2\dot{\varphi},$$

где φ — угол поворота кривошипа, $a_i(\varphi)$ — функции, отражающие массово - геометрические свойства движителя, γ_1 и γ_2 — электромеханические параметры привода, U — напряжение питания двигателя.

Применяя линеаризацию:

$$a_i(\varphi)\approx a_i(\varphi^*)+\frac{\partial a_i}{\partial\varphi}(\varphi^*)\delta\varphi,$$

описывая движение с учетом отклонений:

$$\ddot{\varphi}=\ddot{\varphi}^*+\delta\ddot{\varphi},\ \ \dot{\varphi}=\dot{\varphi}^*+\delta\dot{\varphi},\ \varphi=\varphi^*+\delta\varphi$$

и пренебрегая слагаемыми более высокой малости, уравнение ошибки принимает вид:

$$\begin{aligned}&a_2(\varphi^*)\delta\ddot{\varphi}+2a_1(\varphi^*)\dot{\varphi}^*\delta\dot{\varphi}+\left(\frac{\partial a_1}{\partial\varphi}(\varphi^*)(\dot{\varphi}^*)^2+\frac{\partial a_2}{\partial\varphi}(\varphi^*)\ddot{\varphi}^*\right)\delta\varphi+\\&+\left[a_2(\varphi^*)\ddot{\varphi}^*+a_1(\varphi^*)(\dot{\varphi}^*)^2\right]=\gamma_1 U-\gamma_2\dot{\varphi}^*-\gamma_2\delta\dot{\varphi},\end{aligned}\tag{1}$$

где φ^* — программный закон изменения угла поворота ведущего кривошипа, $\delta\varphi$, $\delta\dot{\varphi}$, $\delta\ddot{\varphi}$ — ошибки угла, угловой скорости и углового ускорения. Распространение сигнала в цифровых системах управления происходит не мгновенно, что обусловлено спецификой функционирования датчиков, каналов обмена информацией и объемом программного кода, ответственного за генерацию управляющего сигнала. Все это приводит к возникновению временной задержки τ при передаче управляющего воздействия от задающего устройства к объекту управления. Запаздывание управления можно в первом приближении описать дифференциальным выражением вида [6, 7]:

$$U(t^*-\tau)\approx U(t^*)-\frac{dU(t^*)}{dt^*}\tau.$$

В этом случае уравнение ошибки, учитывающее запаздывание в управляющем канале, принимает следующую форму:

$$a_2(\varphi^*)\delta\ddot{\varphi}+\left[2a_1(\varphi^*)\dot{\varphi}^*+\gamma_2\right]\delta\dot{\varphi}+\left(\frac{\partial a_1}{\partial\varphi}(\varphi^*)(\dot{\varphi}^*)^2+\frac{\partial a_2}{\partial\varphi}(\varphi^*)\ddot{\varphi}^*\right)\delta\varphi=$$

$$=-\left[\frac{\partial a_2(\varphi^*)}{\partial\varphi^*}\dot{\varphi}^*\ddot{\varphi}^*+a_2(\varphi^*)\dddot{\varphi}^*+\gamma_2\ddot{\varphi}^*+\frac{\partial a_1(\varphi^*)}{\partial(\varphi^*)}(\dot{\varphi}^*)^3+2a_1(\varphi^*)\dot{\varphi}^*\ddot{\varphi}^*\right]\tau.$$

Неизбежное нарастание ошибки можно устранить, введением обратных связей в систему управления и соответствующих слагаемых в функцию управляющего воздействия уравнения ошибки (1):

$$U(t)=U\left(t^*\right)+k_1\delta\varphi+k_2\delta\dot{\varphi},$$

$$\ldots=\gamma_1 U(t)-\gamma_1\frac{dU(t)}{dt}\tau-\gamma_2\dot{\varphi}^*-\gamma_2\delta\dot{\varphi},$$

где $U\left(t^*\right)$ — программное напряжение без учета временной задержки, а k_1 и k_2 — коэффициенты обратных связей по координате и скорости соответственно.

Тогда правая часть выражения (1) будет равна:

$$\ldots=\gamma_1\left[U^*\left(t^*\right)+k_1\delta\varphi+k_2\delta\dot{\varphi}\right]-\gamma_1\frac{d\left[U^*\left(t^*\right)+k_1\delta\varphi+k_2\delta\dot{\varphi}\right]}{dt}\tau-\gamma_2\dot{\varphi}^*-\gamma_2\delta\dot{\varphi},$$

$$\ldots=\gamma_1U^*\left(t^*\right)+\gamma_1k_1\delta\varphi+\gamma_1k_2\delta\dot{\varphi}-\gamma_1\frac{dU^*\left(t^*\right)}{dt}\tau-\gamma_1k_1\frac{d\delta\varphi}{dt}\tau-\gamma_1k_2\frac{d\delta\dot{\varphi}}{dt}\tau-\gamma_2\dot{\varphi}^*-\gamma_2\delta\dot{\varphi},$$

$$\ldots+\gamma_1k_2\delta\ddot{\varphi}\tau+\left[\gamma_1k_1\tau-\gamma_1k_2+\gamma_2\right]\delta\dot{\varphi}-\gamma_1k_1\delta\varphi=-\gamma_1\frac{dU^*\left(t^*\right)}{dt}\tau.$$

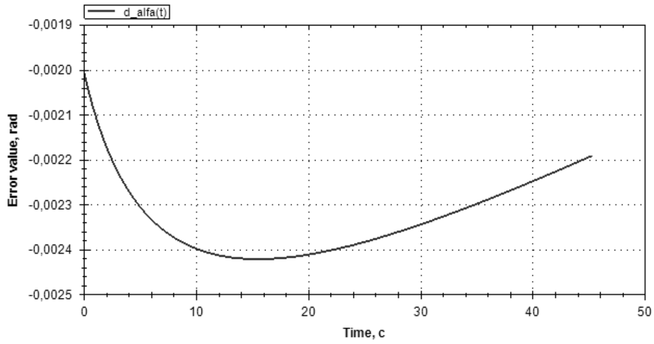
Таким образом, уравнение ошибки, учитывающее временную задержку при передаче управляющего сигнала, параметры движителя и системы регулирования с обратными связями, примет вид:

$$\begin{aligned}
&\delta\ddot{\varphi}+\frac{\gamma_2-MA_1^2\sin\left(2\alpha+2C_1\right)\dot{\alpha}+\gamma_1k_1\tau-\gamma_1k_2}{MA_1^2\left[0.5+0.5\cos\left(2\alpha+2C_1\right)\right]+\gamma_1k_2\tau}\delta\dot{\varphi}+\\
&+\frac{-MA_1^2\cos\left(2\alpha+2C_1\right)\dot{\alpha}_1^2-MA_1^2\sin\left(2\alpha+2C_1\right)\ddot{\alpha}-\gamma_1k_1}{MA_1^2\left[0.5+0.5\cos\left(2\alpha+2C_1\right)\right]+\gamma_1k_2\tau}\delta\varphi=\\
&=\frac{2MA_1^2\sin\left(2\alpha+2C_1\right)\dot{\alpha}\ddot{\alpha}\tau}{MA_1^2\left[0.5+0.5\cos\left(2\alpha+2C_1\right)\right]+\gamma_1k_2\tau}+\\
&+\frac{MA_1^2\cos\left(2\alpha+2C_1\right)\dot{\alpha}_1^3\tau-0.5MA_1^2\cos\left(2\alpha+2C_1\right)\ddot{\alpha}\tau-0.5MA_1^2\ddot{\alpha}_1\tau-\gamma_2\ddot{\alpha}_1\tau}{MA_1^2\left[0.5+0.5\cos\left(2\alpha+2C_1\right)\right]+\gamma_1k_2\tau}
\end{aligned}\qquad(2)$$

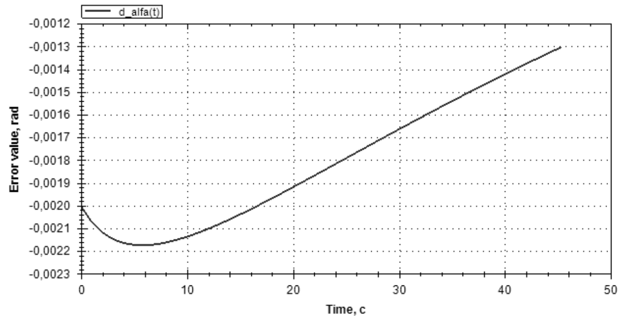
где α – угол поворота кривошипа для ноги, находящейся в фазе опоры, M – масса корпуса аппарата, A_1 – конструктивный параметр циклового шагающего механизма.

Теоретическое исследование вопроса устойчивого движения технических средств, описываемых дифференциальными уравнениями с переменными коэффициентами, сопряжено с аналитическими трудностями и большими временными затратами при отыскании характеристических чисел [8]. Для технической реализации движения необходимо знать только значения коэффициентов обратных связей, при которых перемещение будет устойчивым. Поэтому предлагается поиск подходящих значений коэффициентов обратных связей исходя из характера поведения численного решения уравнения (2).

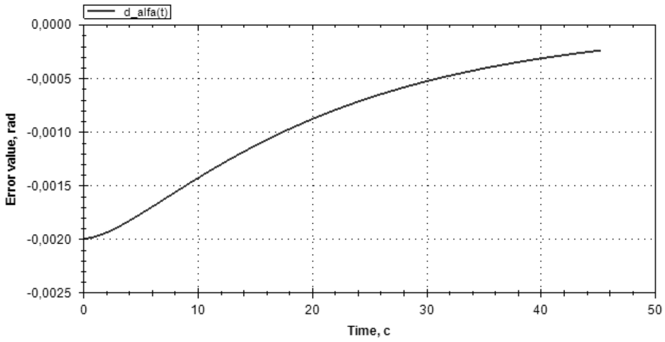
Результаты компьютерного моделирования поведения уравнения ошибки (2) показывают, что введение обратной связи по скорости при положительных значениях коэффициента не оказывает влияние на уменьшение ошибки, а отрицательные значения приводят к резкому ее нарастанию. Это согласуется с ранее полученными результатами об отсутствии асимптотической устойчивости уравнения типа (1) при любых значениях коэффициента обратной связи по скорости [5].



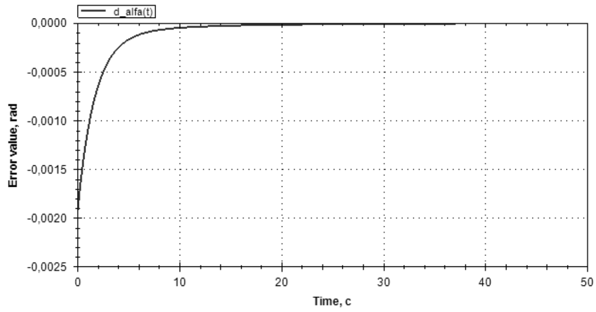
$k_1 = -0.1$



$k_1 = -0.3$



$k_1 = -1$



$k_1 = -10$

Рис. 4. Характер затухания ошибки в зависимости от значения коэффициента обратной связи по угловой координате

Применение обратной связи по координате способствует затуханию ошибки (Рис. 4). Чем больше по модулю отрицательное значение коэффициента, тем быстрее она затухает. Асимптотическое затухание ошибки в фазе опоры достигается при коэффициенте: $k_1 = -10$. Полагалось, что временное запаздывание составляло 20 мс, а корпус двигался со скоростью порядка 3 мм/с.

Разработанный программный модуль по анализу поведения ошибки с учетом запаздывания цифровой системы управления предполагается адаптировать к программе компьютерного моделирования динамики движения шагающего аппарата "Циклон" и управления его физической моделью. Научный интерес представляет так же вопрос влияние на устойчивость обратных связей, получаемых численным дифференцированием [9].

1. Охоцимский Д.Е., Голубев Ю.Ф. Механика и управление движением автоматического шагающего аппарата. М.: Наука, 1984. С. 310.
2. Брискин Е. С., Леонард А. В., Малолетов А. В. Синтез циклового шагающего механизма с направляющей и критерии его оценки // Теория Механизмов и Машин. 2011. № 1(17). Том 9. С. 14–24.
3. Леонард, А.В. Цикловый шагающий движитель с направляющими. Свойства. Управление. Пути совершенствования / Леонард А.В. // Известия ВолгГТУ. Серия "Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах". Вып. 16: межвуз. сб. науч. ст./ВолгГТУ. -Волгоград, 2013. -№ 8 (111). -С. 81-85;
4. Брискин, Е.С. О безударном режиме движения шагающей машины со сдвоенным поворотным движителем / Брискин Е.С., Леонард А.В. // Мехатроника, автоматиза- ция, управление. - 2013. - № 11. - С. 25-27 + 2-я и 3-я стр. обложки.
5. Брискин, Е.С. Устойчивость поступательного движения шагающей машины с цикловыми движителями / Е.С. Брискин, А.В. Леонард // Изв. РАН. Теория и системы управления. - 2013. - № 6. - С. 131-138;
6. Stability of Cooperating Manipulators with Symmetric Position / Force Control and Time Delay / Anatoli Schneider, Igor Zeidis, Klaus Zimmermann // 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. - С. 313-322.- Англ.
7. Красовский Н. Н. Некоторые задачи теории устойчивости движения. М.: ФИЗМАТЛИТ, 1959. С. 211.
8. Четаев Н. Г. Устойчивость движения. 3-е изд. - М.: Наука, 1965, С. 175

9. Feedback Delays and Advanced Arguments in a Simple Balancing Problem (with T. Insperger , G. Stepan, and R. Wohlfart), submitted to ENOC 2011, Rome, Italy.

A. Maloletov, K. Lepetukhin, N. Sharonov, E. Briskin

THE CONTROL OF CINEMATICALLY RELATED WALKING MACHINES GROUP

Volgograd State Technical University, Russia
dtm@vstu.ru

А.В. Малолетов, К.Ю. Лепетухин, Н.Г. Шаронов, Е.С. Брискин

УПРАВЛЕНИЕ ГРУППОЙ КИНЕМАТИЧЕСКИ СВЯЗАННЫХ ШАГАЮЩИХ МАШИН*

Волгоградский государственный технический университет, Волгоград
dtm@vstu.ru

1. Постановка задачи

При решении ряда транспортных задач широко используются автопоезда, представляющие собой соединение в единый комплекс нескольких транспортных средств, совместно выполняющих одну операцию [,]. Известны исследования по совместному применению составных аппаратов и с шагающими движителями []. Одной из ключевых задач, возникающих при управлении составными машинами, является задача построения программных законов движения как корпусов машин, так и их движителей, что для шагающих аппаратов представляет особую сложность в связи со сложностью самих движителей.

Одним из примеров составных машин являются дождевальные машины кругового действия (Рис. 1.а) [, ,]. Эти машины представляют собой несколько однотипных модулей, совместно несущих ферменную многосекционную конструкцию, на которой размещены поливные форсунки, водопроводные трубы и шланги. В центр поля подводится вода и монтируется насосная установка, к которой подключается первая секция дождевальной машины, к которой в свою очередь подключается вторая секция и так далее. При движении ферма дождевальной машины описывает круг (Рис. 1.б), в центре которого находится насосная установка.

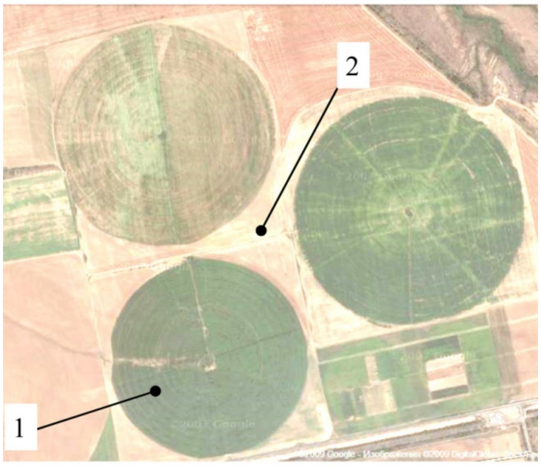


Рис. 1. Дождевальная машина кругового действия: а) шагающая опора, б) спутниковая фотография сельхозугодий, 1 — обрабатываемое поле, 2 — необрабатываемый участок;

Одним из основных недостатков дождевальных машин кругового действия является наличие значительных участков необрабатываемой земли. Применение шагающих приводов в опорах дождевальных машин потенциально позволяет менять форму фермы дождевальной машины во время движения таким образом, чтобы обрабатываемый участок поля был не круглым, что приведёт к увеличению коэффициента использования земли. Это требует решения задачи построения программных законов движения корпуса и ног каждого из шагающих модулей, обеспечивающих согласованное движение всей системы в целом.

* Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ (проект № 862) и РФФИ (№№ 14-08-01002а, 14-08-97041 р_поволжье_а)

Существуют задачи, в которых требуется согласованное управление пространственным положением корпусов машин. Но в большинстве случаев, при выполнении различных манёвров, достаточно ограничиться рассмотрением движения в плоскости опорной поверхности.

Рассматривается комплекс нескольких сочленённых шагающих машин, корпуса которых совершают плоско-параллельное движение.

В отличие от машин с традиционными движителями, более манёвренные [] шагающие аппараты могут быть соединены в структуры более сложных форм, реализующих более разнообразные движения. На Рис. 2 показаны примеры соединения машин в различные структурные схемы. Линейное параллельное соединение (Рис.2.в) соответствует кинематической схеме дождевальной машины.

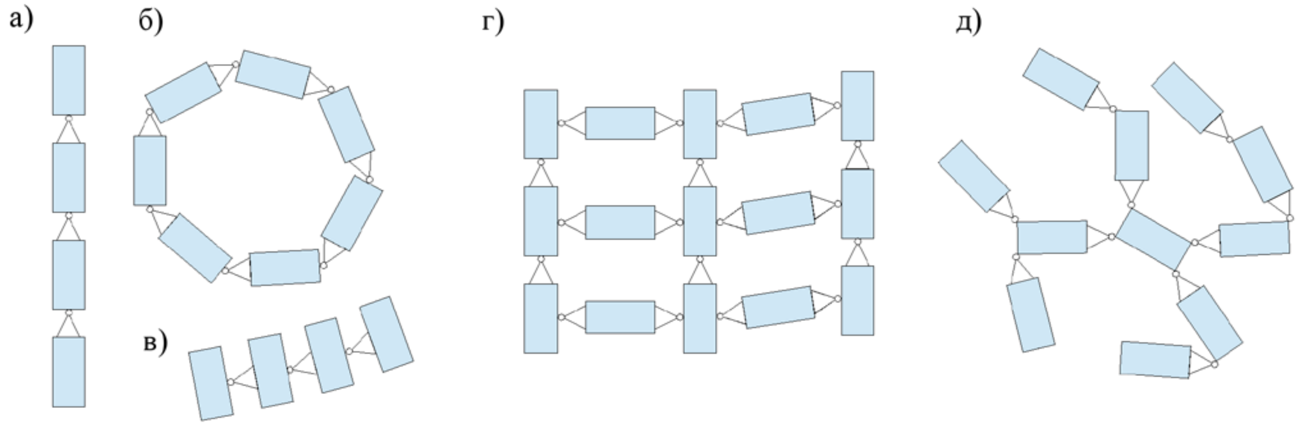


Рис. 2. Примеры структурных схем составных машин.
а) линейное последовательное соединение (поезд), б) кольцо,
в) линейное параллельное соединение (линия), г) сеть, д) древо

2. Управление шагающим аппаратом

Каждая шагающая машина представляет собой систему твёрдых тел, состоящую из корпуса и n^* одинаковых ног, n из которых в некоторый рассматриваемый момент времени находятся в опоре. В зависимости от кинематической схемы движителей различное количество приводов участвует в обеспечении движения корпуса в плоскости опорной поверхности. Например, для ортогонально-поворотного движителя [] машины «Ортоног» (рисунок 3) число этих приводов равно двум, а их общее количество равно $2n$. Учитывая, что корпус как твёрдое тело, совершающее плоско-параллельное движение, имеет три степени свободы, общее число степеней свободы, управление которыми должно быть согласовано $N = 2n + 3$. Управление приводами, находящимися в фазе переноса и не взаимодействующими с грунтом, задаётся в виде функций обобщённых координат и скоростей соответствующих опорных ног.

Рис. 3. Шагающая машина «Ортоног»

В практике управления реальными мобильными аппаратами в постоянно изменяющихся условиях внешней среды бывает удобнее задаваться не законами движения корпуса и ног, а законами изменения их обобщённых скоростей в подвижной системе отсчёта [].

С учётом требования кинематически точного движения без проскальзывания стоп по грунту, можно записать $2n$ кинематических соотношений. Например, для машины «Ортоног» []:

$$\begin{cases} V_{C\tau} - \Omega R_j \sin\varepsilon_j = \dot{\rho}_j \cos\psi_j + \left(\Omega + \dot{\psi}_j\right)\left(-\rho_j \sin\psi_j - h_j \cos\psi_j\right) \\ V_{Cn} + \Omega R_j \cos\varepsilon_j = \dot{\rho}_j \sin\psi_j + \left(\Omega + \dot{\psi}_j\right)\left(\rho_j \cos\psi_j - h_j \sin\psi_j\right) \end{cases} \quad (1)$$

где $V_{C\tau}$ и V_{Cn} — проекции скорости центра машины на подвижные продольную и поперечную оси; Ω — угловая скорость корпуса; R_j — модуль радиус-вектора, задающего положение оси крепления движителя в подвижной ситеме координат, связанной с корпусом машины; ε_j — угол между R_j и продольной осью машины;ψ_j — угол поворота движителя относительно корпуса; ρ_j перемещение привода курсового движения механизма шагания; h_j — длина поперечного рычага крепления привода к вертикальной оси; $j = 1, 2 \dots n$.

Для получения замкнутой системы уравнений выражения, $2n$ кинематических соотношений (1) должны быть дополнены 3 уравнениями управления, вид которых должен быть различным. Например, в простейшем случае это могут быть законы

$$\begin{aligned} &V_{C\tau} = V_{C\tau}(t) \\ &V_{Cn} = V_{Cn}(t) \\ &\Omega = \Omega(t) \end{aligned} \quad (2)$$

В более сложных случаях это могут уравнения, включающие в себя $\dot{\rho}_j$ и $\dot{\psi}_j$, а также обобщённые координаты системы. В общем виде уравнения управления могут быть представлены матричной форме:

$$\mathbf{A} \times \mathbf{V} = \mathbf{U} \quad (3)$$

где $\mathbf{A}$ — матрица управления системы, размерности $K \times N$; K — количество степеней свободы; N — количество обобщённых скоростей, принципиально доступных для управления; $\mathbf{U}$ — матрица-столбец управляющих воздействий размерности K; $\mathbf{V}$ — матрица-столбец обобщённых скоростей размерности N.

Матрица-столбец **V** определяется кинематической схемой машины и не меняется во время работы машины за исключением случаев реконфигурации [], если машина реализует такую возможность. А матрицы **A** и **U** меняются во время движения, обеспечивая реализацию различных законов управления.

Например, для шагающей машины «Ортоног» матрица-столбец **V** имеет вид

$$\boldsymbol{V} = \left(V_{C\tau}, V_{Cn}, \Omega, \dot{\rho}_1, \dot{\rho}_2, \dot{\rho}_3, \dot{\rho}_4, \dot{\psi}_1, \dot{\psi}_2, \dot{\psi}_3, \dot{\psi}_4\right)^T \quad (4)$$

а матрицы вида

$$\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{U} = \begin{bmatrix} V\cos(\omega t) \\ V\sin(\omega t) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

обеспечивают поступательное движение корпуса по окружности радиусом V/ω. Совместное решение уравнений (1) и (3) в этом случае позволяет найти все законы изменения обобщённых скоростей $\dot{\rho}_j$ и $\dot{\psi}_j$.

Блочная матрица [**A**|**U**] может быть названа расширенной матрицей управления.

3. Управление комплексом шагающих аппаратов

Уравнение (3) сохраняет свой вид и для случая системы состоящей из нескольких независимых машин, меняются только размерности и компоненты матриц. Например, для двух независимых машин эти матрицы могут иметь вид:

$$\boldsymbol{V} = \left(V_{C\tau 1}, V_{Cn1}, \Omega_1, \dot{\rho}_{11}, \dot{\rho}_{12}, \dot{\rho}_{13}, \dot{\rho}_{14}, \dot{\psi}_{11}, \dot{\psi}_{12}, \dot{\psi}_{13}, \dot{\psi}_{14}, V_{C\tau 2}, V_{Cn2}, \Omega_2, \dot{\rho}_{21}, \dot{\rho}_{22}, \dot{\rho}_{23}, \dot{\rho}_{24}, \dot{\psi}_{21}, \dot{\psi}_{22}, \dot{\psi}_{23}, \dot{\psi}_{24}\right)^T$$

$$[\mathbf{A}|\mathbf{U}] = \left[\begin{array}{ccc|c|ccccccccccc|c} 1 & 0 & 0 & & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & U_{11}(t) \\ 0 & 1 & 0 & & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & U_{12}(t) \\ 0 & 0 & 1 & \mathbf{O}_{6x8} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & U_{13}(t) \\ 0 & 0 & 0 & & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & U_{21}(t) \\ 0 & 0 & 0 & & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & U_{22}(t) \\ 0 & 0 & 0 & & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & U_{23}(t) \end{array}\right] \tag{6}$$

где $\mathbf{O}_{6x8}$ — нулевая матрица размерности 6×8; U_{ij} — управляющие воздействия; числовой индекс при обобщённых скоростях $V_{C\tau}$, V_{Cn}, Ω и первый индекс при обобщённых скоростях $\dot{\rho}, \dot{\psi}$ обозначает номер машины. Здесь для первой машины аналогично (5) задаются законы управления скоростями корпуса, а для второй машины управляющие законы задаются для приводов курсового перемещения всех четырёх движителей и приводов поворота 1 и 2 движителей.

Если на движение группы машин наложены M связей, то выражение (3) дополняется M уравнений связи, что может быть записано в матричной форме:

$$\left[\frac{\mathbf{A}}{\mathbf{S}}\right] \times \mathbf{V} = \left[\frac{\mathbf{U}}{\mathbf{B}}\right] \tag{7}$$

где $\mathbf{S}$ — матрица коэффициентов при обобщённых скоростях в уравнениях связи, размерности $M \times N$, $\mathbf{B}$ — матрица-столбец размерности M, компоненты которого содержат правые части уравнений связи. При этом количество степеней свободы K уменьшается на величину M.

Блочная матрица $\left[\frac{\mathbf{A}|\mathbf{U}}{\mathbf{S}|\mathbf{B}}\right]$ называется расширенной матрицей управления-сочленения.

Теоретически соединения машин могут представлять собой различные кинематические пары. Однако на практике целесообразно ограничиться исследованием шарнирных соединений. Уравнения связи цилиндрического шарнира имеют вид:

$$\begin{aligned} f_{\xi ij} &= \xi_{Dij} - \xi_{Dji} = 0 \\ f_{\eta ij} &= \eta_{Dij} - \eta_{Dji} = 0 \end{aligned} \tag{8}$$

где $\xi_{Dij}, \eta_{Dij}, \xi_{Dji}, \eta_{Dji}$ — координаты в неподвижной системе отсчёта точки крепления корпуса j машины на корпусе i машины и наоборот.

Координаты точки D_{ij} задаются в подвижной системе отсчёта, связанной с корпусом i машины: x_{Dij}, y_{Dij}. А координаты этих точек в неподвижной системе отсчёта, соответственно имеют вид:

$$\begin{aligned} \xi_{Dij} &= \xi_{Ci} + x_{Dij} \cos \varphi_i - y_{Dij} \sin \varphi_i \\ \eta_{Dij} &= \eta_{Ci} + x_{Dij} \sin \varphi_i + y_{Dij} \cos \varphi_i \end{aligned} \tag{9}$$

где $\xi_{Ci}, \eta_{Ci}, \varphi_i$ — координаты в неподвижной системе отсчёта центра i машины и её угол поворота относительно неподвижных осей.

Поскольку уравнения (1), (3), (7) представляют собой дифференциальные уравнения первого порядка относительно обобщённых координат, то для включения уравнений связей в эту систему уравнений, их необходимо продифференцировать. А для обеспечения устойчивости решения, необходимо использовать поправочные слагаемые []:

$$\begin{aligned} \dot{f}_{\xi ij} + \lambda f_{\xi ij} &= 0 \\ \dot{f}_{\eta ij} + \lambda f_{\eta ij} &= 0 \end{aligned} \tag{10}$$

где λ — постояный коэффициент, подбирающийся экспериментально при выполнении расчётов.

Уравнения связи в форме (10) после взятия производных и записи скоростей в проекциях на оси подвижных систем отсчёта, связанных с машинами:

$$
\begin{aligned}
&V_{C\tau i}\cos\varphi_i - V_{Cni}\sin\varphi_i - (x_{Dij}\sin\varphi_i + y_{Dij}\cos\varphi_i)\dot\varphi_i \\
&\quad - V_{C\tau j}\cos\varphi_j + V_{Cnj}\sin\varphi_j + (x_{Dji}\sin\varphi_j + y_{Dji}\cos\varphi_j)\dot\varphi_j = -\lambda f_{\xi ij} \\
&V_{C\tau i}\sin\varphi_i + V_{Cni}\cos\varphi_i + (x_{Dij}\cos\varphi_i - y_{Dij}\sin\varphi_i)\dot\varphi_i \\
&\quad - V_{C\tau j}\sin\varphi_j - V_{Cnj}\cos\varphi_j - (x_{Dji}\cos\varphi_j - y_{Dji}\sin\varphi_j)\dot\varphi_j = -\lambda f_{\eta ij}
\end{aligned}
\qquad (11)
$$

Например, при объединении в комплекс двух машин типа «Ортоног» $M = 2$, $K = 4$. Расширенная матрица управления-сочленения в этом случае имеет вид:

$$
\left[\frac{\mathbf{A}|\mathbf{U}}{\mathbf{S}|\mathbf{B}}\right] = \left[\begin{array}{ccc|c|ccc|c|c}
 & & & \mathbf{A}_{4x22} & & & & & \begin{matrix} U_1(t) \\ U_2(t) \\ U_3(t) \\ U_4(t) \end{matrix} \\
\hline
\cos\varphi_1 & -\sin\varphi_1 & a_{5,3} & \mathbf{O}_{1x8} & -\cos\varphi_2 & \sin\varphi_2 & a_{5,11} & \mathbf{O}_{1x8} & \lambda(f_{\xi 21} - f_{\xi 12}) \\
\sin\varphi_1 & \cos\varphi_1 & a_{6,3} & \mathbf{O}_{1x8} & -\sin\varphi_2 & -\cos\varphi_2 & a_{6,11} & \mathbf{O}_{1x8} & \lambda(f_{\eta 21} - f_{\eta 12})
\end{array}\right] \qquad (12)
$$

где $\mathbf{A}_{4x22}$ — матрица управления размерности 4×22, конкретный вид которой зависит от реализуемого управления; U_1, U_2, U_3, U_4 — управляющие воздействия; $\mathbf{O}_{1x8}$ — нулевая матрица размерности 1×8; коэффициенты

$$
\begin{aligned}
a_{5,3} &= -(x_{D12}\sin\varphi_1 + y_{D12}\cos\varphi_1) \\
a_{5,11} &= (x_{D21}\sin\varphi_2 + y_{D21}\cos\varphi_2) \\
a_{6,3} &= (x_{D12}\cos\varphi_1 - y_{D12}\sin\varphi_1) \\
a_{6,11} &= -(x_{D21}\cos\varphi_2 - y_{D21}\sin\varphi_2)
\end{aligned}
\qquad (13)
$$

При необходимости матрицы легко расширяются на случай большего количества машин в шагающем комплексе.

4. Заключение

Разработанный подход в случае плоско-параллельного движения позволяет единообразно описывать движение составных машин как с разомкнутыми, так и с замкнутыми кинематическими цепями.

Матричное представление законов управления шагающими аппаратами с учётом их структурных и кинематических особенностей представляется удобным инструментом для организации интерфейсов управления, позволяющим как проектировать программные движения аппаратов, так и изменять режимы движения непосредственно во время их работы.

1. Гуджоян О. П., Троицкая Н. А. Перевозка специфических грузов автомобильным транспортом: Учеб. для вузов. – М.: Транспорт, 2001. – 160 с.
2. Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. – М.: Физматлит, 2009. – 280 с.
3. Брискин, Е.С. Управление движением группы шагающих машин при перемещении моногруза / Брискин Е.С., Шаронов Н.Г. // Искусственный интеллект. - 2007. - № 4. - С. 408-415.
4. Брискин, Е.С. Опыт разработки и испытаний шагающих опор дождевальной машины / Брискин Е.С., Чернышев В.В., Жога В.В., Малолетов А.В. // Тракторы и сельхозмашины. - 2011. - № 9. - С. 27-31.
5. Center-pivot automatization for agrochemical use / J. Palacin, J.A. Salse, X. Clua, J. Arno, R. Blanco, C. Zanuy // Computers and Electronics in Agricultur 49 (2005). P. 419–430. doi:10.1016/j.compag.2005.08.006
6. Optimal design of center pivot systems with water supplied from wells / M.A. Moreno, D. Medina, J.F. Ortega, J.M. Tarjuelo // Agricultural Water Management 107 (2012). P. 112– 121. doi:10.1016/j.agwat.2012.01.016
7. Брискин, Е.С. Сравнительный анализ колесных, гусеничных и шагающих машин / Брискин Е.С., Чернышев В.В., Малолетов А.В., Шаронов Н.Г. // Робототехника и техническая кибернетика. -

2013. - № 1 (1). - С. 6-14.
8. Брискин, Е.С. Об управлении движением шагающей машины со сдвоенными ортогонально-поворотными движителями / Брискин Е.С., Вершинина И.П., Малолетов А.В., Шаронов Н.Г. // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. - 2014. - № 3. - С. 168.
9. Малолетов, А.В. О походках реконфигурируемой модульной шагающей машины с ортогонально-поворотными движителями / Малолетов А.В., Брискин Е.С., Колесов А.М. // Мехатроника, автоматизация, управление. - 2012. - № 5. - С. 50-55.
10. Виттенбург, Й Динамика систем твердых тел. — М.: Мир, 1980. — 296 с.

A. Iliyshenko, L. Laboshin, A. Lukashin
CONTROL SYSTEM OF THE DISTRIBUTED COLLECTIVE OF ROBOTS

Peter The Great Saint-Petersburg Polytechnic University;
RTC, Saint-Petersburg, Russia

А.С. Ильяшенко, Л.Ю. Лабошин, А.А. Лукашин
СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕННЫМ КОЛЛЕКТИВОМ РОБОТОВ

Санкт-Петербургский Политехнический Университет Петра Великого;
ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург
ilyashenko.alex@gmail.com, laboshinl@neva.ru,lukash@neva.ru

Этот робот, ДВ-5, имеет в своем подчинении шесть роботов.
И не просто в подчинении: они – часть его.
(А. Азимов)

Актуальной задачей в современной робототехнике является разработка робототехнических устройств, выполняющих сложные операции в экстремальных условиях. С учетом того, что сложность выполняемых операций стремительно растет, для успешного их выполнения приходится усложнять архитектуру используемых РТО с целью решения более трудоемких вычислительных задач, требующих производительных ресурсов.

Технические требования по эксплуатации и эргономике к высокопроизводительным вычислительным устройствам, которые позволяют обрабатывать большие объемы данных и оперативно принимать решения, значительно затрудняют создание роботов с большой степенью автономности и малыми размерами, так как обладают значительным энергопотреблением, немалыми габаритами и требуют наличия сопутствующих необходимых систем (например, охлаждения).

В этом случае обычно решение задачи предоставляют группам РТО, которые могут разбивать задачу на части и выполнять их последовательно, не создавая помех друг другу. Довольно полный обзор существующих систем группового управления роботами сделан в [1]. Однако такой подход обладает существенных недостатком - необходимостью организации ситуационной осведомленности и информационной связанности всех элементов системы. То есть каждый объект системы должен иметь доступ к информации об остальных элементах системы и должен иметь возможность осуществить обмен данными с ними. Для решения этих задач необходимо обеспечить обмен информацией между элементами системы с возможностью синхронизированной и гарантированной доставки сообщений от одного элемента системы к другому.

В качестве одного из подходов к решению данной проблемы предлагается перенос всей вычислительной нагрузки на систему в единый вычислительный центр (центр управления)[2, 3].В виду необходимости предоставления каждому элементу системы определенных вычислительных ресурсов и разграничения доступа к ним наиболее удобным для использования является облачная платформа, которая предоставляет выделять виртуальные машины с необходимым количеством ресурсов для каждого из устройств. Таким образом, перенос вычислительных мощностей робототехнических систем в среду облачных вычислений позволяет снять вычислительную нагрузку с РТО и тем самым снять ряд требований по производительности бортового оборудования и повысить его мобильность.

Процессы взаимодействия роботов с центром управления должны работать независимо друг от друга, но при этом иметь возможность синхронизации. Такую возможность дает ипользование двух методологий программирования: многопоточности и параллелизма. Многопоточное программирование определяется архитектурой приложения, которая позволяет/разрешает параллельное исполнение в рамках одного вычислительного узла. Параллельное программирование служит для эффективного использования вычислительных ресурсов за счет одновременного исполнения кода на нескольких узлах. Такой подход существенно повышает сложность разработки ПО, что связано с независимыми друг от друга действиями потоков/процессов, которые в процессе выполнения пытаются оптимальным образом разделить имеющиеся вычислительные ресурсы. Это разделение и организация доступа к ресурсам вызывает ряд проблем: изменяемых состояний, взаимных блокировок, совместного использования общей области памяти, гонки данных(RaceConditions). Существует несколько подходов к разработке многопоточных параллельных приложений, позволяющих избежать или упростить решение вышеописанных проблем, одним из которых является акторная модель (actormodel)[4].

Акторная модель вычислений - это математическая модель распределенных параллельных вычислений, представляющая собой систему, состоящую из автономных объектов – акторов (виртуальных процессоров). Каждый актор имеет свой «почтовый адрес». Акторы взаимодействуют между собой посредством асинхронной передачи сообщений на «почтовый адрес», присвоенный каждому актору.

Таблица 1

Обмен сообщениями между акторами, принадлежащими разным акторным системам (транспортный уровень)

№ измерения	**Время пересылки сообщения, мс**							
	TCP				**UDP**			
	JSON 303 б	**DOC 64 кб**	**JPEG 1,4 мб**	**PDF 4,6 мб**	**JSON 303 б**	**DOC 64 кб**	**JPEG 1,4 мб**	**PDF 4,6 мб**
1	20	32	110	382	30	-	-	-
2	24	43	117	337	24	-	-	-
3	27	35	119	344	15	-	-	-
4	23	35	111	363	26	-	-	-
5	22	38	103	337	24	-	-	-
6	27	37	123	346	17	-	-	-
7	26	33	109	353	25	-	-	-
8	27	42	120	336	24	-	-	-
9	24	37	133	338	24	-	-	-
10	25	39	122	340	30	-	-	-
Среднее	24,50	37,10	116,70	347,60	23,90			

Таблица 2

Обмен сообщениями между акторами, принадлежащими разным акторным системам (прикладной уровень)

№ измерения	**Время пересылки сообщения, мс**							
	HTTP				**ZeroMQ**			
	JSON 303 б	**DOC 64 кб**	**JPEG 1,4 мб**	**PDF 4,6 мб**	**JSON 303 б**	**DOC 64 кб**	**JPEG 1,4 мб**	**PDF 4,6 мб**
1	480	442	468	479	27	37	132	379
2	456	441	449	478	29	39	134	368
3	448	461	463	468	33	45	148	371
4	455	448	461	530	29	42	121	390
5	468	459	458	472	30	44	143	385
6	465	483	500	510	29	38	139	376
7	441	448	467	504	26	47	120	398
8	451	554	444	537	28	44	141	377
9	455	452	469	382	32	41	137	369
10	451	455	468	489	26	46	139	390
Среднее	457,00	464,30	464,70	484,90	28,90	42,30	135,40	380,30

Сообщения, отправленные, но еще не обработанные актором, помещаются в очередь в «почтовом ящике» получателя. Получатель снимает сообщение из очереди и обрабатывает его. В качестве ответа на принятое сообщение, актор может производить вычисления и менять собственное состояние, передавать сообщения другим акторам, создавать других акторов. Основными характеристиками модели акторов являются:

– параллельность вычислений внутри отдельного актора и между акторами;
– динамическое создание акторов;
– добавление адресов акторов в сообщения;
– взаимодействие через прямой асинхронный обмен независимо от порядка получения сообщений.

Акторную модель реализует ряд фреймворков, одним из которых является Akka. Помимо того, что он реализует акторную модель, он так же содержит множество технологий для повышения производительности и отказоустойчивости: ZeroMQ для передачи сообщений между акторами, Netty для реализации кластерной архитектуры и другие.

Для подобного ПО также вводится и имеет большое значение понятие масштабируемости – способности приложения увеличивать свою производительность при добавлении новых аппаратных/вычислительных узлов, то есть наращивании дополнительных ресурсов без структурных изменений центрального узла приложения.

Масштабируемость оценивается при помощи отношения прироста производительности системы к приросту используемых ресурсов. Существует два основных вида масштабирования:

– вертикальное масштабирование – повышение вычислительных способностей существующего узла в системе;
– горизонтальное масштабирование – добавление в систему новых вычислительных узлов.

Так как акторная модель состоит из отдельных акторов, обменивающихся сообщениями между собой, каждый из которых реализует свою деятельность в рамках отдельного, независимого от других потока, данная модель относительно просто может быть развернута на нескольких узлах вычислительной системы и имеет высокий показатель горизонтальной масштабируемости, с легкостью получаемой при помощи распределения акторов по узлам вычислительной среды, а также вертикальной при разработке соответствующей архитектуры приложения.С использованием описанной акторной модели разработана архитектура приложения (Рис. 1), которая решает задачу управления робототехническими объектами и их взаимодействия в единой вычислительной среде.

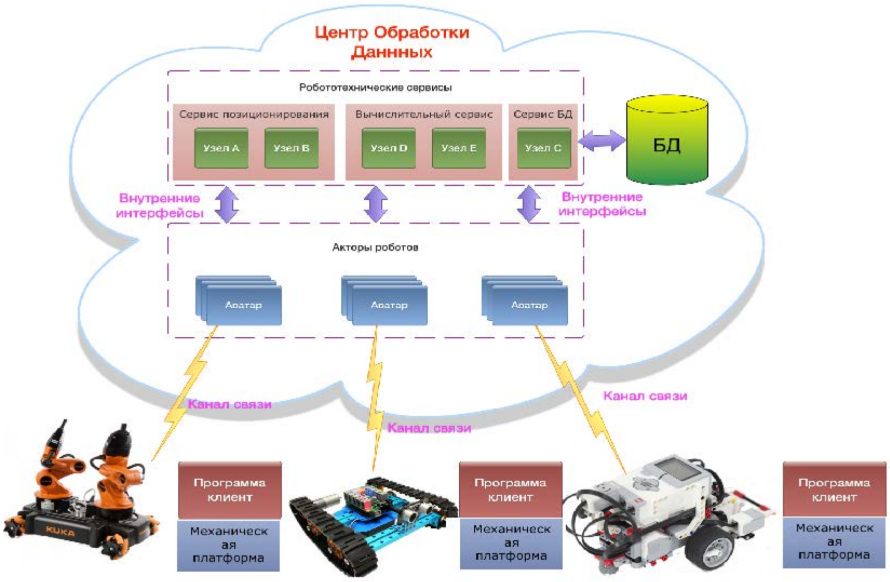


Рис. 1. Архитектура разработанной системы

Разработанная архитектура позволяет решить все вышеописанные проблемы и тем самым позволяет осуществить повышение функциональности робототехнических объектов, за счет предоставления возможности использования высокопроизводительных ресурсов облачной вычислительной платформы и тем самым решать более трудоемкие задачи. Также этот подход дает возможность уменьшить габариты и повысить мобильность робототехнических объектов, вовлеченных в процесс выполнения групповых операций.И еще одним немаловажным плюсом является минимизация затрат, связанных с потерей работоспособности робототехнических объектов при работе в экстремальных условиях.

1. Каляев, И. А., А. Р. Гайдук, and С. Г. Капустян. "Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. -М.: Физматлит 280 (2009).
2. Заборовский В.С., Лукашин А.А., Мулюха В.А. Платформа управления киберфизическими объектами // Открытые системы. СУБД. 2014 №9 С. 30-32
3. Мулюха В.А., Заборовский В.С., Ильяшенко А.С., Лукашин А.А. Сетецентрический метод организации информационного взаимодействия киберфизических объектов в среде облачных вычислений// ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ РОБОТОТЕХНИКА. // Труды международной научно-технической конференции. – Санкт-Петербург: Изд-во «Политехника-сервис», 2014. – С. 229-234.
4. CarlHewitt; PeterBishop; RichardSteiger. AUniversalModularActorFormalismforArtificialIntelligence. // 1973. – IJCAI, Stanford

G.S. Vasilyanov, A.A. Lavrov

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF ALGORITHMS OF ADAPTIVE MANAGEMENT OF THE QUADRUPED ROBOTIZED PLATFORMS

Peter The Great Saint-Petersburg Polytechnic University
g.vasilyanov@mail.ru, alecse-lavro@rambler.ru

Introduction

The walking way of movement represents a great interest at the movement on in the advance unprepared surfaces (AUS). Unlike wheel robots, legged robots possess bigger passability on these types of a surface.

Legged robots can be used in different spheres: research of hard-to-reach spots, including, integrated to danger to human life, carrying out prospecting and rescue operations, transfer of a load and arms, etc.

The movement without adaptation to a surface, with use of rigidly set cyclogram **-** the simplest type of the movement at which the managing director of the robot the program reads out sequence of movements of the robot, transforming them to microcommands of control devices, for example, of servo actuators.

This type of the movement possesses undoubted advantage - simplicity, however it has a number of shortcomings: for example, the robot is not capable to adapt for a surface and to save the provision of the center of gravity, as a result, the probability of capsizing of the robot increases, and fluctuations of the body increase.

The adaptive movement allows expanding traficabilities of the robot on AUS.

Treat the tasks solved in the course of adaptation to AUS: a problem of the greatest possible decrease in fluctuations of the body of angles of heel and pitch, a problem of overcoming of obstacles of different value without capsizing (usually, about 1/5-1/3 heights of the robot), a problem of search of a point of support for robot extremities, a problem of maintenance of provision of a projection of the center of gravity of the robot in the reference triangle formed by the extremities which are in a reference phase.

The solution of these tasks demands different availability of sensors: gyroscopes, accelerometers, or the inertial measuring units (IMU) integrating them, enkoder for reading of the current angles of rotation of joints of each of feet, end sensors of a contact of a surface or sensors of pressure, the electronic vision systems (EVS) and other sensors which indications are used when forming shagatelny cyclograms. Besides, exact servo actuators are necessary for reproduction of the received cyclograms.

In the simplest options of creation of robots with adaptive system of management, accelerometers, gyroscopes, and also end sensors of a contact of a surface working for short circuit are used.

Robots that are more complex include IMU containing the 3rd axial gyroscope, the 3rd axial accelerometer, end sensors of pressure in a common ground with a surface, EVS, systems of navigation.

As examples of already developed robots with adaptive system of management, it is possible to bring robots Ragno, StarlETH, and BigDog.

In each of the developed robots the network from sensors allowing to solve effectively problems of adaptation to AUS is used. It should be noted that IMU is a part of each of them. Until recently IMU with the 3rd axial gyroscope and the 3rd axial accelerometer were an expensive component which cost is commensurable with the cost of the robot, however recently there was a number of rather inexpensive IMU available to a wide range of developers in the field of a robotics.

Besides, recently there was a new class of high-precision servo actuators - the "intelligent" servo actuators representing the digital servo actuator with the built-in microcontroller allowing in batch mode not only to receive commands from the control device (CD), but also to send to CD data on the status, in particular, about the current angle of rotation, the current loading, the moment, attached to an output shaft, speed, etc.

The purpose of this report - to give results of development, creation and practical testing of the quadruped legged robot using indications only of a gyroscope and the accelerometer (as a part of IMU) on which are calculated angles of heel and pitch. By means of the received corners, the developed software and the used "intelligent" servo actuators the correction of angular situation (CAS) of the legged robot is executed. The purpose of CAS- minimization of fluctuations of the body, possibility of capsizing of the legged robot at the movement on AUS and saving of a projection of the center of gravity in a reference triangle.

Measurement of angles of heel and pitch of the legged robot

Used for creation of the legged robot IMU is called GY-80. It is popular IMU for different robotic tasks. On a payment are located: 3rd axial gyroscope / L3G4200D (ST Microelectronics), 3rd axial accelerometer / ADXL345 (Analog Devices), 3rd axial compass / HMC5883L (Honeywell), barometer + temperature / BMP085 (Bosch) sensor.

Thus, by means of this IMU we can calculate accelerations and angular speeds concerning axes (X, Y, Z) the connected coordinate system, and also, according to indications of a barometer to measure height above sea level and ambient temperature. However we will note that in our case only indications of the accelerometer and a gyroscope on which are used angles of heel and pitch are calculated. Indications of other sensors are not considered.

According to indications of accelerometers it is possible to calculate values of corners of pitch and a roll.

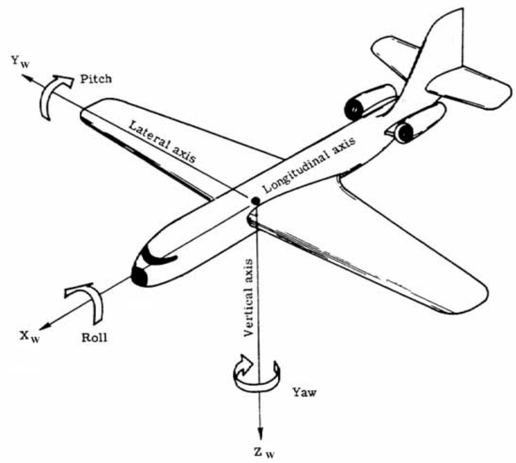


Fig. 1. Direction of axes of coherent coordinate system

The signal arriving from an accelerometer output on each axis of the connected coordinate system in addition to a useful signal includes the component caused by vibration of object, the component caused by linear accelerations of object, the components caused by own noise and drift of zero level of the accelerometer.

Therefore the correct measurement of corners with use of accelerometers perhaps at rest or uniform motion.

Using indications of gyroscopes, based on Euler's equations, it is possible to calculate derivatives of angles of heel and pitch [5].

Integrating indications on x axes and Y, it is possible to receive required corners. However, the signal arriving from an output of the sensor of angular speed on each axis in addition to a useful signal includes the components caused by own noise and drift of zero level. At integration of such signal, the error quickly collects.

To get rid of shortcomings of the systems constructed only on accelerometers or only on gyroscopes of sensors of angular situation, the accelerometer plus a gyroscope uses a combination [2].

For combination of the data obtained from gyroscopes and accelerometers usually use either Kallman's filters, or complementary filters [1, 4] (KF). In work KF which, unlike Kallman's filter, does not use a probabilistic component at calculations is used.

The signal calculated through indications of the accelerometer arrives on low pass filter (LPF) input. The signal calculated through indications of a gyroscope arrives after integration on an input of LPF, which does not pass the error arising due to integration of, own noise and drift of a gyroscope.

Problem of maintenance of provision of a projection of the center of gravity in a reference triangle

One of tasks at a system design of control of the legged robot is the problem of saving by the robot of a projection of the center of gravity in the triangle formed by three feet standing on the earth (such triangle call a "reference" triangle) while the fourth foot executes process of a raising and movement on a new position.

If to support angles of heel and pitch in certain limits, it is possible to guarantee the correct situation of four-legged platform (FLP).

Return kinematics of a foot of the legged robot

In fig. 2 the scheme of the return kinematics of the left feet is represented.

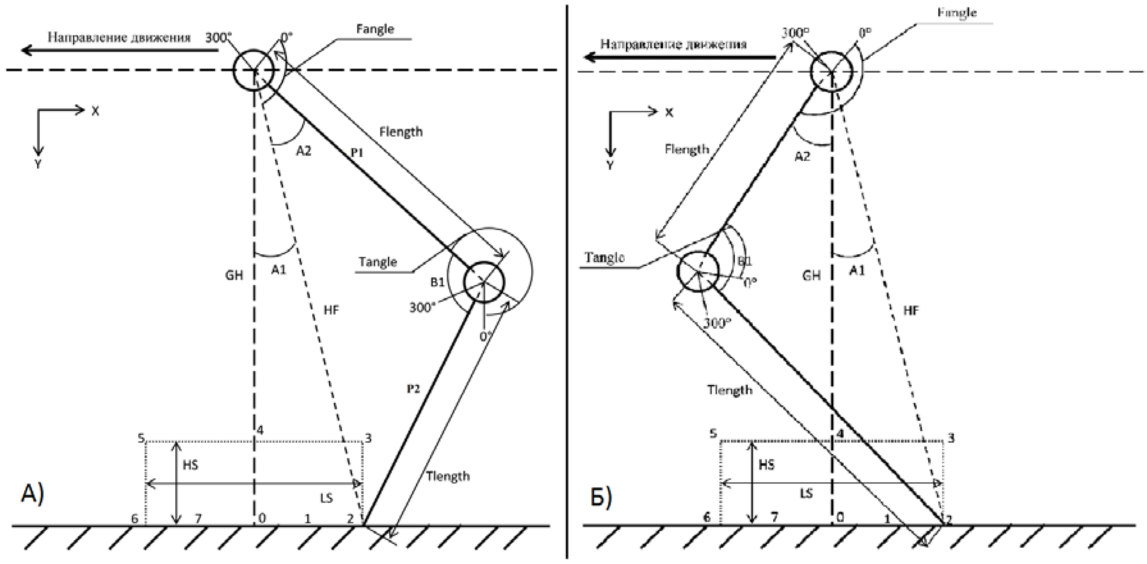


Fig. 2. Scheme of kinematics of the left feet of the robot

In fig. 2A GH (Ground Height) - distance from a robot foot point of support to a surface; Flength (Femur Length) - length of "hip" of a foot of the robot, its first link (P1); Tlength (Tibia Length) - length of "shin" of a foot of the robot, its second link (P2); HS (Height of Step) - robot foot step height; LS (Length of Step) - robot foot step length; HF (Height of Full leg) - robot foot length; A1, A2 - corners of which there is a resulting angle of rotation of the servo actuator which is responsible for the robot foot P1 segment; B1 - a corner of which there is a resulting angle of rotation of the servo actuator which is responsible for the robot foot P2 segment. The direction of the movement is opposite to an axis OH.

The developed algorithm of recalculation of cyclograms of the movement of feet uses three variables as input data: distance to a surface (GH (Ground Height)), HS (Height of Step) - height of a step of a foot of the robot and LS (Length of Step) - length of a step of a foot of the robot (Fig. 2).

Thus 2 constant parameters are required for the algorithm is is long shins and is long robot foot hips (Flength (Femur Length) - length of "hip" of a foot of the robot, its first link, Tlength (Tibia Length) - length of "shin" of a foot of the robot, its second link).

The GH, HS and LS parameters are set in the course of the movement. In particular, GH and HS influence situation FLP compensation process, and LS - on traffic control of the robot, in particular, on execution of turns.

Finding of heights of raising of feet of the robot

To find heights of raising of each of feet, we need to know error angles from horizontal situation, and also geometrical length and width of the robot.

Let's explain stay also robot width with help of fig. 3A.

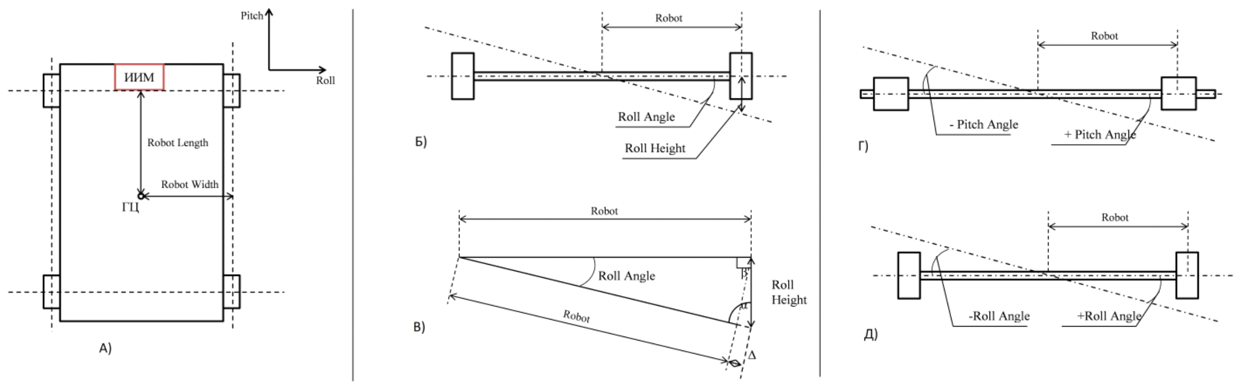


Fig. 3. Illustrations of the geometrical data necessary for process of CAS

Thus, it is long the robot is the Robot Length parameter. Width of the robot is the Robot Width parameter.

Let's explain finding of a deviation for each of robot feet by means of fig. 3B. In drawing the look on the robot behind is shown, in fig. 3B already private option for the explanation of calculations is shown.

In both drawings Robot Width is the width of the robot, Roll Angle - angle of heel, Roll Height - deviation height on angle of heel are calculated by means of IMU, a corner β = 90 °.

Deviation height is determined by angle of heel geometrically as:

$$RH = \frac{\sin RA * RW}{\sin(90 - RA)} \qquad (1)$$

, where RH - Roll Height, RW - Robot Width, RA - Roll Angle.

Similarly, there is deviation height for a pitch corner.

To receive the full height of a deviation on both corners, namely, on angle of heel and pitch, it is necessary to sum up heights received separately for angles of heel and pitch, thus it is necessary to remember a corner sign. Let's explain it by means of fig. 3G and fig. 3D.

At a robot inclination on a pitch corner forward, for front feet the corner of pitch has a positive sign, and for the back - negative. At a robot deviation on angle of heel to the right, the angle of heel for the right feet will have a positive sign, and for the left - negative. Thus, there is a deviation on angle of heel and pitch taking into account a sign, and then the obtained data are summed up.

Principles of execution of process of CAS

Let's explain on an example the principle of execution of process of CAS. Let's address to fig. 4.

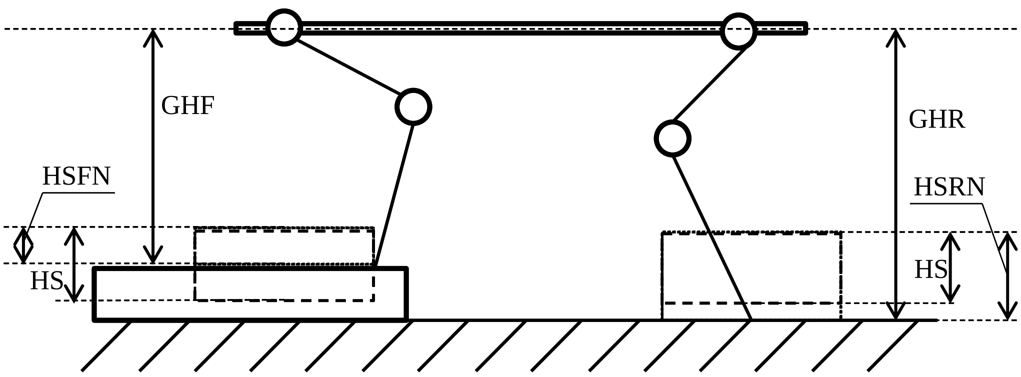


Fig. 4. Illustration of the principle of execution of correction of angular position of the robot

In fig. 4, HS - initial value of height of a step, HSFN (Height of Step Front New) - new value of height of a step for front feet / feet, GHF (Ground Height Front) - value of distance to a surface for front feet / feet, HSRN (Height of Step Rear New) - step height for back feet / feet, GHR (Ground Height Rear) - distance to a surface for back feet / feet.

When IMU of the robot fixes the deviations connected with an output for admissible borders, the subprogramme of calculation of the compensating values calculates necessary values for each of feet separately. These values are opposite to the direction of a deviation, that is if any of feet rose above, the compensating value (CV) will be negative and, on the contrary, if any of feet fell, CV will be positive.

The received CV eliminates a difference in the current position of a foot and the set surface height, and also step height.

However, it is necessary to consider that it is impossible to lower or raise feet above certain borders as to lead it to irreversible effects it can is thus necessary to enter threshold value, which will allow controlling limit values for height of a step and distancing to a surface.

Just before execution of process of correction of position of the robot, and also calculation of new values for heights to a surface and heights of a step for each of feet, process of saving of the current provisions of servo actuators to begin the new movement, with the current place on which the stop was executed is executed.

Outputs

During work, the prototype presented on fig. 5 was created.

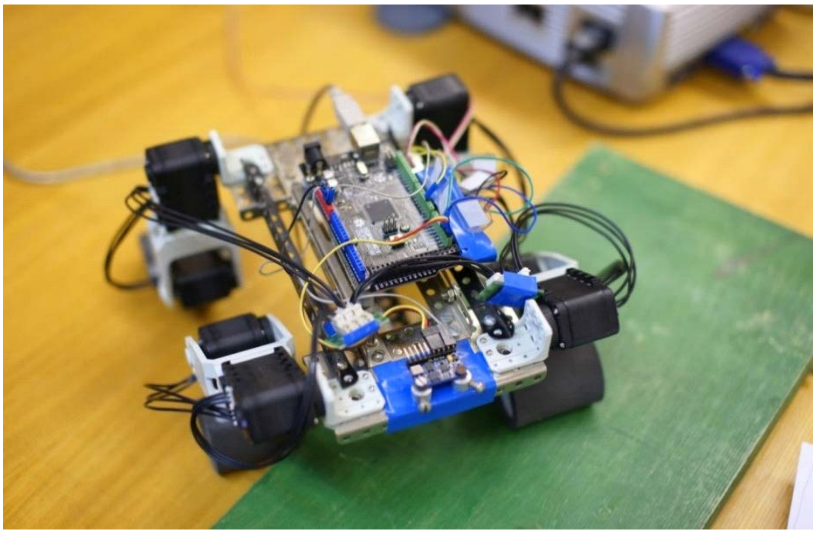


Fig. 5. A prototype of the walking robotized platform

In the course of work on algorithm of correction of situation, formulas for calculations of angles of rotation of servo actuators are displaid, the algorithms allowing to manage automatically uniform motion of "intelligent" servo actuators were developed, and also to regulate their speed of turn and, as a result, movement speed.

Also own technique of recalculation of trajectories of the movement of feet leaning on the set variables, such as length and height of a step, and also distance to a surface was developed (which it is necessary for stabilization process execution).

Originally, tests of the robot were carried out with the switched-off CAS mode. After carrying out tests, it was established that without use of CAS, the robotized platform, at the movement on a flat surface, moves evenly, having insignificant hesitations of the body. However, at the movement on the plane with step rise and descent to height in 1/5 heights of the robot (approximately, 3 centimeters), the platform underwent considerable fluctuations of the body and, finally, overturned.

When carrying out tests with the included CAS mode, it was established that at the movement on a flat surface, the robotized platform showed the similar speed and uniformity of movement as at insignificant fluctuations of the body, the algorithm similar to the movement without CAS is used. However, at the movement on the plane with step rise and descent, the 3 centimeters high, robotized platform underwent significantly smaller deviations and never overturned.

1. Baerveldt, R. Klang. A Low-Cost and Low-weight Attitude Estimation System for an Autonomous Helicopter, 1998.
2. Eric Robert Bachmann. Inertial And Magnetic Tracking Of Limb Segment Orientation For Inserting Humans Into Synthetic Environments. Dissertation, Naval Postgraduate School, 2000. 197 c.
3. D. Belter, Adaptive foothold selection for a hexapod robot walking on rough terrain, 7th Workshop on Advanced Control and Diagnosis, Zielona Góra, 2009. c100-107.
4. McCarron, Low-Cost IMU Implementation via Sensor Fusion Algorithms in the Arduino Environment, 2013.
5. Амелькин Н.И. Кинематика и динамика твердого тела. М.: Московский физико-технический институт, 2000. 64 с.

Г.С. Васильянов, А.А. Лавров

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЧЕТЫРЕХНОГИМИ РОБОТИЗИРОВАННЫМИ ПЛАТФОРМАМИ

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
g.vasilyanov@mail.ru, alecse-lavro@rambler.ru

Введение

Шагающий способ передвижения представляет большой интерес при движении по заранее неподготовленным поверхностям (ЗНП). В отличие от колёсных роботов, шагающие роботы обладают большей проходимостью по данным типам поверхности.

Шагающие роботы могут быть использованы в различных сферах: исследование труднодоступных мест, в том числе, сопряженных с опасностью для жизни человека, проведение разведывательных и спасательных работ, перенос груза и вооружения и т.д.

Движение без адаптации к поверхности, с использованием жестко заданной циклограммы – самый простейший вид движения, при котором управляющая роботом программа считывает последовательность движений робота, преобразуя их в микрокоманды управляющих устройств, например, сервоприводов.

Данный вид движения обладает несомненным достоинством – простотой, однако он имеет ряд недостатков: например, робот не способен адаптироваться к поверхности и сохранять положение своего центра тяжести, как следствие, возрастает вероятность опрокидывания робота, а так же увеличиваются колебания корпуса.

Адаптивное движение позволяет расширить возможности передвижения робота по ЗНП.

К задачам, решаемым в процессе адаптации к ЗНП, относятся: задача максимально возможного снижения колебаний корпуса по углам крена и тангажа, задача преодоления препятствий различной величины без опрокидывания (обычно, порядка 1/5-1/3 высоты робота), задача поиска точки опоры для конечностей робота, задача поддержания положения проекции центра тяжести робота внутри опорного треугольника, образованного конечностями, находящимися в опорной фазе.

Решение данных задач требует наличия различного рода датчиков: гироскопов, акселерометров, либо объединяющих их инерциальных измерительных модулей (ИИМ), энкодеров для считывания текущих углов поворота сочленений каждой из ног, концевых датчиков касания поверхности или датчиков давления, систем технического зрения (СТЗ) и других датчиков, показания которых используются при формировании шагательных циклограмм. Кроме того, необходимы точные сервоприводы для воспроизведения полученных циклограмм.

В простейших вариантах построения роботов с адаптивной системой управления, используются акселерометры, гироскопы, а так же концевые датчики касания поверхности, работающие на замыкание.

Более сложные роботы включают в себя ИИМ, содержащие 3-х осевой гироскоп, 3-х осевой акселерометр, концевые датчики давления в точке соприкосновения с поверхностью, СТЗ, системы навигации.

В качестве примеров уже разработанных роботов с адаптивной системой управления, можно привести роботов Ragno, StarlETH, а так же BigDog.

В каждом из разработанных роботов используется сеть из датчиков, позволяющая эффективно решать задачи адаптации к ЗНП. Стоит отметить, что в состав каждого из них входит ИИМ. До недавнего времени ИИМ с 3-х осевым гироскопом и 3-х осевым акселерометром являлись дорогостоящим компонентом, стоимость которого соизмерима со стоимостью самого робота, однако в последнее время появился ряд сравнительно недорогих ИИМ, доступных широкому кругу разработчиков в области робототехники.

Кроме того, в последнее время появился новый класс высокоточных сервоприводов – «интеллектуальные» сервоприводы, представляющие собой цифровой сервопривод со встроенным микроконтроллером, позволяющим в пакетном режиме не только получать команды от управляющего устройства (УУ), но и отправлять на УУ данные о своём состоянии, в частности, о текущем угле поворота, текущей нагрузке, моменте, приложенному к выходному валу, скорости и т.д.

Цель данного доклада – привести результаты разработки, построения и практического испытания четырёхногого шагающего робота, использующего показания только гироскопа и акселерометра (в составе ИИМ) по которым вычисляются углы крена и тангажа. При помощи полученных углов, разработанного программного обеспечения и используемых «интеллектуальных» сервоприводов выполняется коррекция углового положения (КУП) шагающего робота. Цель КУП – минимизация колебаний корпуса, возможности опрокидывания шагающего робота при движении по ЗНП и сохранение проекции центра тяжести внутри опорного треугольника.

Измерение углов крена и тангажа шагающего робота

Используемый для построения шагающего робота ИИМ называется GY-80. Он является популярным ИИМ для различных робототехнических задач. На плате расположены: 3-х осевой гироскоп / L3G4200D (ST Microelectronics), 3-х осевой акселерометр / ADXL345 (Analog Devices), 3-х осевой компас / HMC5883L (Honeywell), барометр + датчик температуры / BMP085 (Bosch).

Таким образом, при помощи данного ИИМ мы можем вычислять ускорения и угловые скорости относительно осей (X, Y, Z) связанной системы координат, а так же, по показаниям барометра измерить высоту над уровнем моря и температуру окружающей среды. Однако отметим, что в нашем случае используются только показания акселерометра и гироскопа по которым вычисляются углы крена и тангажа. Показания остальных датчиков не учитываются.

По показаниям акселерометров можно вычислить значения углов тангажа и крена.

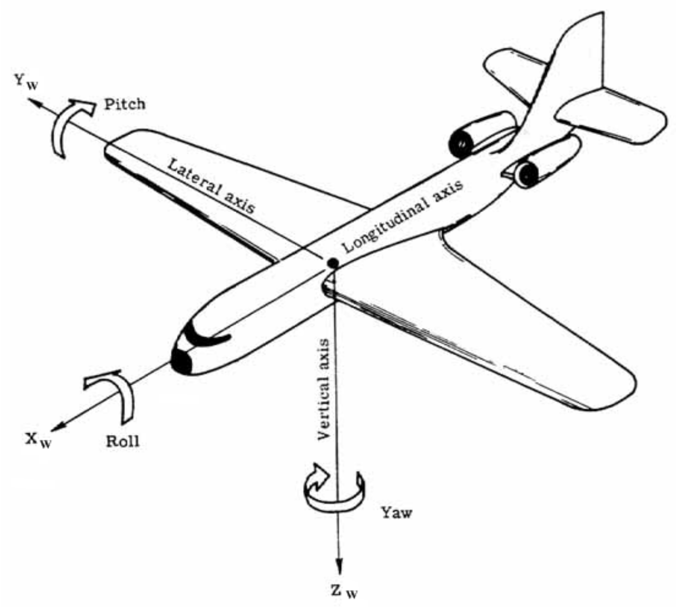


Рис.1. Направление осей связной системы координат

Сигнал, поступающий с выхода акселерометра по каждой оси связанной системы координат, помимо полезного сигнала включает в себя составляющую, обусловленную вибрацией объекта, составляющую, обусловленную линейными ускорениями объекта, составляющие, обусловленные собственными шумами и дрейфом нулевого уровня акселерометра.

Поэтому правильное измерение углов с использованием акселерометров возможно в состоянии покоя или равномерного движения.

Используя показания гироскопов, на основании уравнений Эйлера, можно вычислить производные углов крена и тангажа [5].

Интегрируя показания по осям X и Y, можно получить искомые углы. Однако, сигнал, поступающий с выхода датчика угловой скорости по каждой оси, помимо полезного сигнала включает в себя составляющие, обусловленные собственными шумами и дрейфом нулевого уровня. При интегрировании такого сигнала быстро накапливается ошибка.

Чтобы избавиться от недостатков систем, построенных только на акселерометрах или только на гироскопах, в датчиках углового положения используют комбинацию акселерометр плюс гироскоп [2].

Для объединения данных, получаемых с гироскопов и акселерометров, обычно используют либо фильтры Калмана, либо комплементарные фильтры [1, 4] (КФ). В работе использован КФ, который, в отличие от фильтра Калмана, не использует вероятностной составляющей при расчётах.

Сигнал, вычисленный через показания акселерометра, поступает на вход ФНЧ. Сигнал, вычисленный через показания гироскопа, поступает после интегрирования на вход ФВЧ, который не пропускает ошибку, возникающую за счет интегрирования собственных шумов и дрейфа гироскопа.

Задача поддержания положения проекции центра тяжести внутри опорного треугольника

Одной из задач при проектировании системы управления шагающим роботом является задача сохранения роботом проекции центра тяжести внутри треугольника, образованного тремя стоящими на земле ногами (такой треугольник называют «опорным» треугольником), в то время как четвёртая нога выполняет процесс поднятия и перемещения на новую позицию.

Если поддерживать углы крена и тангажа в определённых пределах, то можно гарантировать правильное положение ЧРП.

Обратная кинематика ноги шагающего робота

На Рис.2 изображена схема обратной кинематики левых ног.

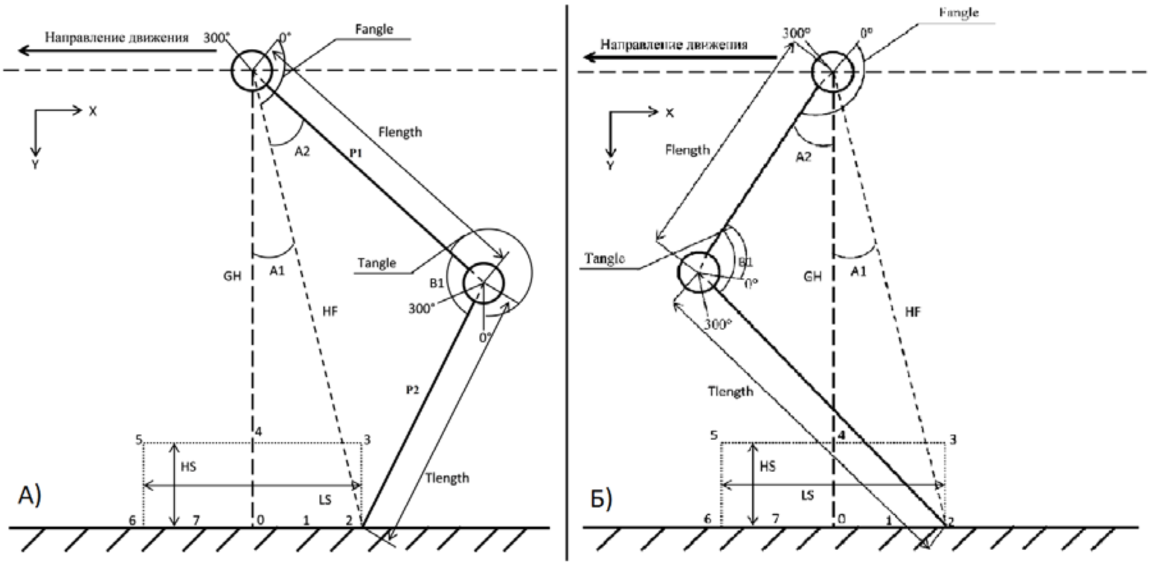


Рис. 2. Схема кинематики левых ног робота

На Рис. 2А GH (Ground Height) – расстояние от точки опоры ноги робота до поверхности; Flength (Femur Length) – длина «бедра» ноги робота, её первого звена (P1); Tlength (Tibia Length) – длина «голени» ноги робота, её второго звена (P2); HS (Height of Step) – высота шага ноги робота; LS (Length of Step) – длина шага ноги робота; HF (Height of Full leg) – длина ноги робота; A1, A2 – углы, из которых складывается результирующий угол поворота сервопривода, отвечающего за сегмент P1 ноги робота; B1 – угол, из которого складывается результирующий угол поворота сервопривода, отвечающего за сегмент P2 ноги робота. Направление движения противоположно оси OX.

Разработанный алгоритм перерасчёта циклограмм движения ног использует в качестве входных данных три переменные: расстояние до поверхности (GH (Ground Height)), HS (Height of Step) – высота шага ноги робота и LS (Length of Step) – длина шага ноги робота (Рис.2).

При этом самому алгоритму требуются 2 константных параметра – это длинна голени и длинна бедра ноги робота (Flength (Femur Length) – длина «бедра» ноги робота, её первого звена, Tlength (Tibia Length) – длина «голени» ноги робота, её второго звена).

Параметры GH, HS и LS задаются в процессе движения. В частности, GH и HS влияют на процесс компенсации положения ЧРП, а LS - на управление движением робота, в частности, на выполнение поворотов.

Нахождение высот подъёма ног робота

Для того чтобы найти высоты подъёма каждой из ног, нам необходимо знать углы отклонения от горизонтального положения, а так же геометрическую длину и ширину робота.

Поясним нахождение длинны и ширины робота при помощи рис. 3А.

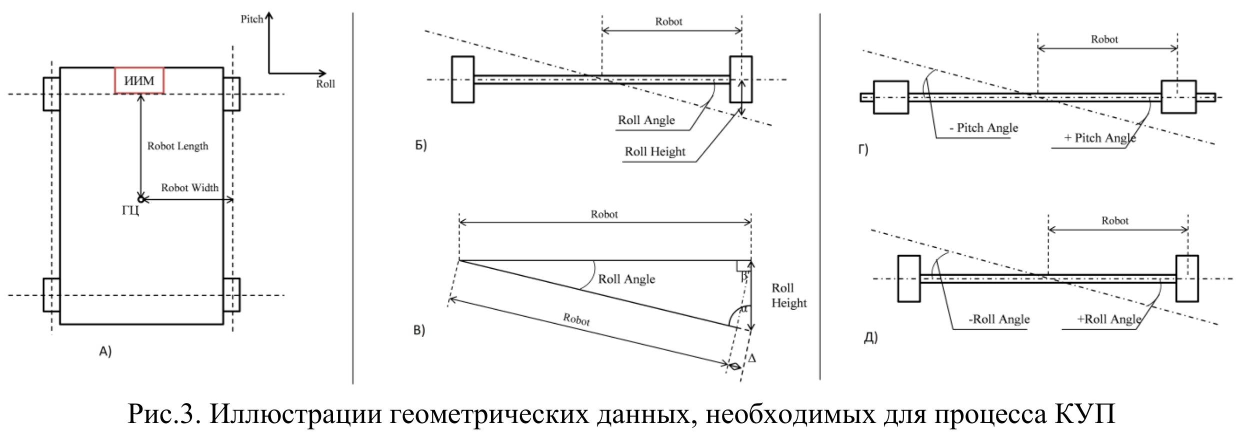


Рис.3. Иллюстрации геометрических данных, необходимых для процесса КУП

Таким образом, длинна робота – это параметр Robot Length. Ширина робота – это параметр Robot Width.

Поясним нахождение отклонения для каждой из ног робота при помощи рис. 3Б. На рисунке показан вид на робота сзади, на рис.3В показан уже частный вариант для пояснения расчётов.

На обоих рисунках Robot Width – это ширина робота, Roll Angle – угол крена, вычисляемы при помощи ИИМ, угол β = 90°, Roll Height – высота отклонения по углу крена.

Высота отклонения по углу крена определяется геометрически как:

$$RH = \frac{\sin RA * RW}{\sin(90 - RA)} \quad (1)$$

, где RH – Roll Height, RW – Robot Width, RA – Roll Angle.

Аналогичным образом находится высота отклонения по углу тангажа.

Для того, чтобы получить полную высоту отклонения по обоим углам, а именно, по углу крена и тангажа, необходимо просуммировать высоты, полученные отдельно для углов крена и тангажа, при этом необходимо помнить о знаке угла. Поясним это при помощи рис. 3Г и Рис. 3Д.

При наклоне робота по углу тангажа вперёд, для передних ног угол тангажа имеет положительный знак, а для задних – отрицательный. При отклонении робота по углу крена вправо, угол крена для правых ног будет иметь положительный знак, а для левых – отрицательный. Таким образом находится отклонение по углу крена и тангажа с учётом знака, а затем полученные данные суммируются.

Принципы выполнения процесса КУП

Поясним на примере принцип выполнения процесса КУП. Обратимся к Рис.4.

На Рис.4, HS – начальное значение высоты шага, HSFN (Height of Step Front New) – новое значение высоты шага для передних ног/ноги, GHF (Ground Height Front) – значение расстояния до поверхности для передних ног/ноги, HSRN (Height of Step Rear New) – высота шага для задних ног/ноги, GHR (Ground Height Rear) – расстояние до поверхности для задних ног/ноги.

Когда ИИМ робота фиксирует отклонения, связанные с выходом за допустимые границы, подпрограмма расчёта компенсирующих значений рассчитывает необходимые значения для каждой из ног в отдельности. Эти значения противоположны направлению отклонения, то есть, если какая-либо из ног поднялась выше, компенсирующее значение (КЗ) будет отрицательным и, наоборот, если какая-либо из ног опустилась, то КЗ будет положительным.

Полученное КЗ устраняет разницу в текущем положении ноги и заданной высотой поверхности, а так же высоту шага.

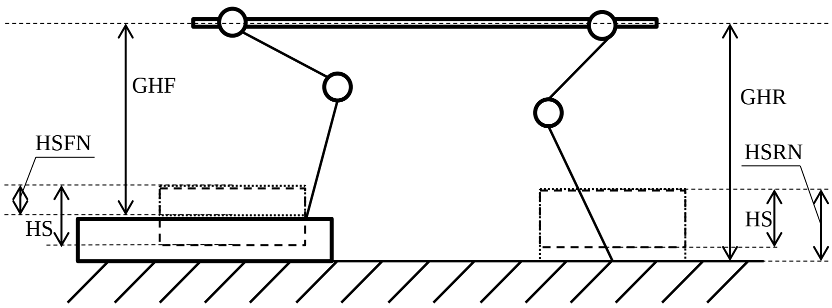


Рис.4. Иллюстрация принципа выполнения коррекции углового положения робота

Однако, необходимо учитывать, что невозможно опустить или поднять ноги выше определённых границ, так как это может привести к необратимым последствиям, таким образом, необходимо ввести пороговое значение, которое позволит контролировать предельные значения для высоты шага и расстояния до поверхности.

Непосредственно перед выполнением процесса коррекции положения робота, а так же расчёта новых значений для высот до поверхности и высот шага для каждой из ног, выполняется процесс сохранения текущих положений сервоприводов для того, чтобы начать новое движение, с текущего места, на котором была выполнена остановка.

Выводы

В ходе работы был создан опытный образец, представленный на Рис.5.

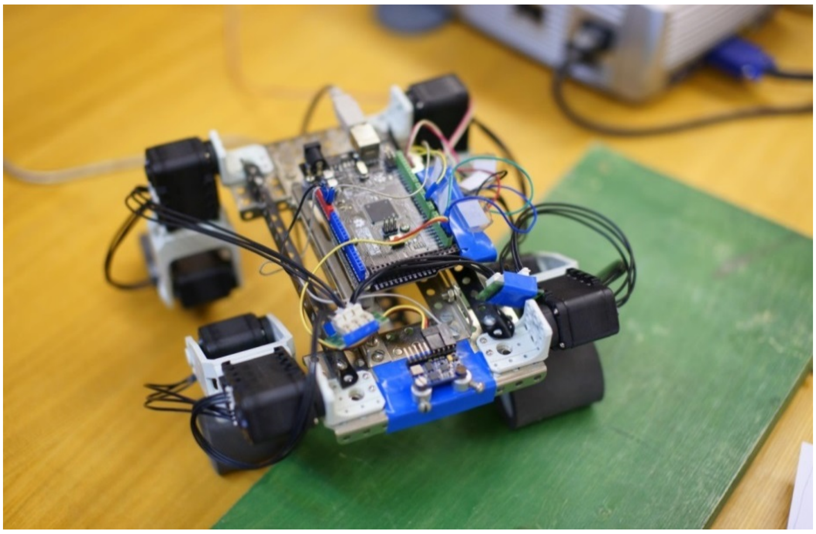


Рис.5. Опытный образец шагающей роботизированной платформы

В процессе работы над алгоритмом коррекции положения, выведены формулы для расчётов углов поворота сервоприводов, были разработаны алгоритмы, позволяющие автоматически управлять равномерным движением «интеллектуальных» сервоприводов, а так же регулировать их скорость поворота и, как следствие, скорость передвижения.

Так же была разработана собственная методика перерасчёта траекторий движения ног, опирающаяся на задаваемые переменные, такие как длина и высота шага, а так же расстояние до поверхности (которое необходимо для выполнения процесса стабилизации).

Первоначально, испытания робота проводились с выключенным режимом КУП. После проведения испытаний, было установлено, что без использования КУП, роботизированная платформа, при движении по ровной поверхности, движется равномерно, испытывая незначительные колебания корпуса. Однако, при движении по плоскости со ступенчатым подъёмом и спуском на высоту в 1/5 высоты робота (примерно, 3 сантиметра), платформа претерпевала значительные колебания корпуса и, в конечном итоге, опрокидывалась.

При проведении испытаний с включенным режимом КУП, было установлено, что при движении по ровной поверхности, роботизированная платформа показывала схожую скорость и равномерность передвижения, так как при незначительных колебаниях корпуса, используется алгоритм, аналогичный движению без КУП. Однако, при движении по плоскости со ступенчатым подъёмом и спуском, высотой 3 сантиметра, роботизированная платформа претерпевала существенно меньшие отклонения и ни разу не опрокинулась.

1. Baerveldt, R. Klang. A Low-Cost and Low-weight Attitude Estimation System for an Autonomous Helicopter, 1998.
2. Eric Robert Bachmann. Inertial And Magnetic Tracking Of Limb Segment Orientation For Inserting Humans Into Synthetic Environments. Dissertation, Naval Postgraduate School, 2000. 197 с.
3. D. Belter, Adaptive foothold selection for a hexapod robot walking on rough terrain, 7th Workshop on Advanced Control and Diagnosis, Zielona Góra, 2009. с100-107.

a. McCarron, Low-Cost IMU Implementation via Sensor Fusion Algorithms in the Arduino Environment, 2013.

4. Амелькин Н.И. Кинематика и динамика твердого тела. М.: Московский физико-технический институт, 2000. 64 с.

V. Filaretov, A. Konoplin, N. Konoplin

AUTOMATIC CORRECTION SYSTEM FOR UNDERWATER VEHICLES LINEAR DISPLACEMENTS

Institute of automation and control processes FEB RAS, Vladivostok, Russia
filaretov@inbox.ru, kayur-prim@mail.ru, konoplin.nikita@gmail.com

В.Ф. Филаретов, А.Ю. Коноплин, Н.Ю. Коноплин

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОЙ КОРРЕКЦИИ ЛИНЕЙНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ*

Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН
Дальневосточный федеральный университет, Владивосток
filaretov@inbox.ru, kayur-prim@mail.ru, konoplin.nikita@gmail.com

Введение

В настоящее время с помощью телеуправляемых и обитаемых подводных аппаратов (ПА) уже выполняются многие исследовательские и технологические работы в глубинах Мирового океана. Интенсивное расширение областей использования этих ПА непрерывно повышает требования к их системам управления (СУ), которые должны обеспечивать точное перемещение указанных объектов в водной среде.

В процессе выполнения подводных работ операторы вручную с помощью органов управления или целеуказателей задают желаемые направления движения ПА. От точности перемещений ПА в заданном направлении зависит успех выполнения многих подводных технологических операций. Существующие СУ [1, 2, 3] позволяют эффективно управлять движением ПА только при отсутствии у них неконтролируемых углов крена и дифферента. Однако под влиянием моментных воздействий со стороны захваченных грузов, подводного кабеля, а также при наличии несимметричности ПА и иных возмущающих факторов у этих аппаратов в процессе движения часто появляются заранее неизвестные дифферент и крен. Скомпенсировать нежелательные угловые смещения ПА с помощью тяг, создаваемых их движителями, в ряде случаев невозможно, так как схемы установки движителей большинства ПА не позволяют управлять углами крена и дифферента. Кроме того, постоянная стабилизация крена и дифферента в ручном режиме оказывает дополнительную нагрузку на оператора, а в автоматическом режиме требует использования специальных следящих систем [4] и приводит к значительным дополнительным энергетическим затратам.

1. Постановка задачи

В работе ставится задача синтеза эффективной системы автоматической коррекции сигналов управления линейными перемещениями ПА, обеспечивающей его точные движения в заданном направлении даже в том случае, когда ПА постоянно имеет произвольно появляющиеся углы крена и дифферента.

2. Определение выражений для автоматической коррекции вектора линейных перемещений ПА

На Рис. 1 схематически показан ПА, который за счет внешнего силового и моментного воздействия в общем случае может иметь произвольные угловые смещения по крену γ и дифференту α, точно измеряемые бортовыми гироскопами. С центром масс *C* ПА, который совпадает с центром его величины, совмещены начала полусвязанной XYZ и жестко связанной $X^*Y^*Z^*$ с его корпусом правых прямоугольных систем координат (СК). Соответствующие оси этих СК при нулевых значениях углов γ и α совпадают. При этом ось *Z* всегда направлена вертикально вверх, ось X^* совпадает с продольной осью ПА, а ось *X* совпадает с проекцией оси X^* на горизонтальную плоскость.

Вектор тяги ПА $\tau^*(t)=[\tau_x^*,\tau_y^*,\tau_z^*]^T$ всегда формируется в СК $X^*Y^*Z^*$, поскольку продольные оси его движителей, создающих соответствующие тяги, жестко связаны с этой СК. Желаемый программный вектор тяги $\tau(t)=[\tau_x,\tau_y,\tau_z]^T$ формируется оператором или программным устройством в СК *XYZ* (см. рис. 1). Он определяет требуемое направление перемещения ПА в абсолютной СК $X_aY_aZ_a$. Если внешние силовые и моментные воздействия отсутствуют, то за счет своей остойчивости ПА имеет нулевой крен и дифферент. В этом случае вектор $\tau^*(t)$ совпадает по направлению с вектором

* Работа проводилась при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (государственное задание 1141)

$\tau(t)$, а его величина с помощью СУ ПА формируется пропорционально этому вектору. Очевидно, что при появлении ненулевых значений γ и (или) α векторы $\tau^*(t)=[\tau_x^*,\tau_y^*,\tau_z^*]^T$ и $\tau(t)=[\tau_x,\tau_y,\tau_z]^T$ перестают совпадать, и ПА начинает перемещаться в направлении вектора $\tau^*(t)=[\tau_x^*,\tau_y^*,\tau_z^*]^T$, а не в правильном направлении, определяемом вектором $\tau(t)=[\tau_x,\tau_y,\tau_z]^T$. Для сохранения заданного направления движения ПА необходимо, учитывая текущие значения углов γ и (или) α, так изменить тяги соответствующих движителей ПА, чтобы в СК $X^*Y^*Z^*$ вместо вектора $\tau^*(t)=[\tau_x^*,\tau_y^*,\tau_z^*]^T$ появился новый вектор $\tau_p(t)=[\tau_{px},\tau_{py},\tau_{pz}]^T$, совпадающий в пространстве с вектором $\tau(t)=[\tau_x,\tau_y,\tau_z]^T$.

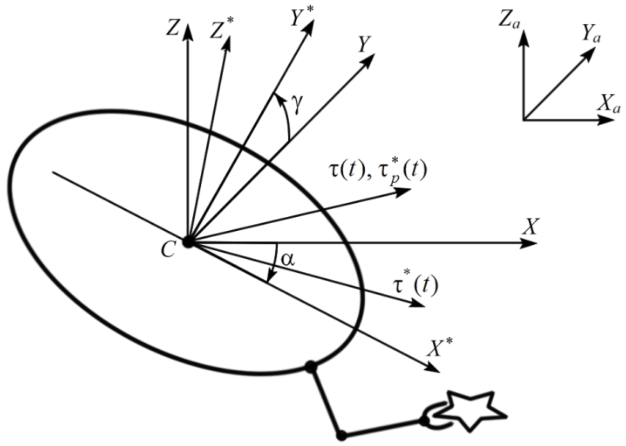


Рис. 1. Схема расположения осей СК XYZ и $X^*Y^*Z^*$ на ПА

Зная элементы вектора $\tau(t)$ в СК *XYZ*, элементы совпадающего с ним вектора $\tau_p(t)$ в СК $X^*Y^*Z^*$ можно получить с помощью выражения [5]

$$\tau_p(t)=R^T\tau(t), \tag{1}$$

где $R\in R^{3x3}$ – матрица поворотов СК $X^*Y^*Z^*$ относительно СК XYZ, *T* – символ транспонирования.

Для определения элементов матрицы *R* необходимо представить поворот ПА вместе с СК $X^*Y^*Z^*$ в виде последовательности элементарных поворотов. При этом оси, относительно которых отсчитываются углы соответствующих поворотов СК $X^*Y^*Z^*$, и последовательность этих поворотов должны выбираться такими, чтобы получаемые при этом углы α и γ действительно соответствовали углам, которые будут измеряться бортовыми гироскопами [6]. Это условие выполняется при следующей последовательности элементарных поворотов СК $X^*Y^*Z^*$: вначале осуществляется ее поворот на угол α вокруг оси Y (ему соответствует матрица элементарного поворота $R_{Y,\alpha}$), а затем поворот на угол γ вокруг оси X^* (ему соответствует матрица элементарного поворота $R_{X^*,\gamma}$). Указанные матрицы поворотов имеют стандартный вид [7]:

$$R_{Y,\alpha}=\begin{bmatrix} C\alpha & 0 & S\alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ -S\alpha & 0 & C\alpha \end{bmatrix}, R_{X^*,\gamma}=\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & C\gamma & -S\gamma \\ 0 & S\gamma & C\gamma \end{bmatrix}, \tag{2}$$

где $S\alpha=\sin\alpha$; $S\gamma=\sin\gamma$; $C\alpha=\cos\alpha$; $C\gamma=\cos\gamma$.

С учетом выражения (2) матрица *R* для описанной последовательности поворотов СК $X^*Y^*Z^*$ вместе с ПА имеет вид:

$$R=R_{Y,\alpha}\,R_{X^*,\gamma}. \tag{3}$$

Необходимо подчеркнуть, что для определения элементов вектора $\tau_p(t)$ в выражении (1) можно использовать только матрицу (3), так как составленная посредством другой последовательности элементарных поворотов любая другая матрица не может быть реализована с использованием углов γ и α, измеряемых бортовыми гироскопическими приборами.

После подстановки транспонированной матрицы *R* в выражение (1) будем иметь:

$$\tau_p(t) = \begin{bmatrix} \tau_x C\alpha - \tau_z S\alpha \\ \tau_x S\alpha S\gamma + \tau_y C\gamma + \tau_z C\alpha S\gamma \\ \tau_x S\alpha\, C\gamma - \tau_y S\gamma + \tau_z C\alpha C\gamma \end{bmatrix}.$$

В результате использование предложенной коррекции позволит оператору управлять желаемым вектором тяги $\tau(t)$, не учитывая появление у ПА произвольных углов α и γ. При этом разработанная система должна обеспечивать перемещения ПА в заданном направлении в СК $X_aY_aZ_a$.

3. Исследование работы системы

Для исследования особенностей функционирования и эффективности системы коррекции линейных перемещений ПА использована математическая модель [3], упрощенная до шести нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих только поступательное движение ПА:

$$M\dot{v} + D(v)v + g(\eta) = \tau^*(t),$$
$$\dot{\eta} = J(\eta)v(t)\,,$$

где $M \in R^{3\times3}$ - матрица массы ПА и присоединенных масс жидкости; $D(v) \in R^{3\times3}$ - матрица гидродинамических сил; $g(\eta) \in R^3$ - вектор гидростатических сил; $v(t) = [v_x, v_y, v_z]^T$ - вектор текущей скорости поступательного движения ПА в СК $X^*Y^*Z^*$; $J(\eta) \in R^{3x3}$ - матрица перехода из СК $X^*Y^*Z^*$ в СК $X_aY_aZ_a$; $\eta = [x_a, y_a, z_a]^T$ - вектор положения точки C в СК $X_aY_aZ_a$.

Параметры модели ПА имеют следующие значения: $m_a = 300кг$ - масса ПА; $\lambda_{11} = 120кг$, $\lambda_{22} = 140кг$, $\lambda_{33} = 140кг$ ($\lambda_{ij} = 0,\ i \neq j,\ i,j = \overline{(1,3)}$) - соответствующие присоединенные массы жидкости; $Y_c = 0.02\,м$ - метацентрическая высота ПА; $d_{1x} = 40\,кгс^{-1}$, $d_{1y} = 50\,кгс^{-1}$, $d_{1z} = 50\,кгс^{-1}$, - коэффициенты вязкого трения, соответствующие линейной, а $d_{2x} = 15\,кгм^{-1}$, $d_{2y} = 25\,кгм^{-1}$, $d_{2z} = 25\,кгм^{-1}$ квадратичной зависимостям гидродинамических сил от скорости движения ПА по его отдельным степеням свободы.

С помощью средств адаптивной коррекции [1] все движители ПА представлены в виде апериодических звеньев первого порядка с постоянными времени $T_d = 0.1с$ и коэффициентами усиления $K_d = 2$, а в модели описаны соответствующими дифференциальными уравнениями первого порядка.

При моделировании ПА имел $\alpha = 30^0$, а $\tau(t) = [15{,}0{,}0]^T$. В этом случае аппарат должен совершать прямолинейное движение в горизонтальной плоскости СК $X_aY_aZ_a$, совпадая с ее осью X_a. На рис. 2 показаны смоделированные перемещения ПА x_{a1} и z_{a1} в СК $X_aY_aZ_a$ без использования синтезированной системы, а также его перемещения x_{a2} и z_{a2} при введении предложенной коррекции.

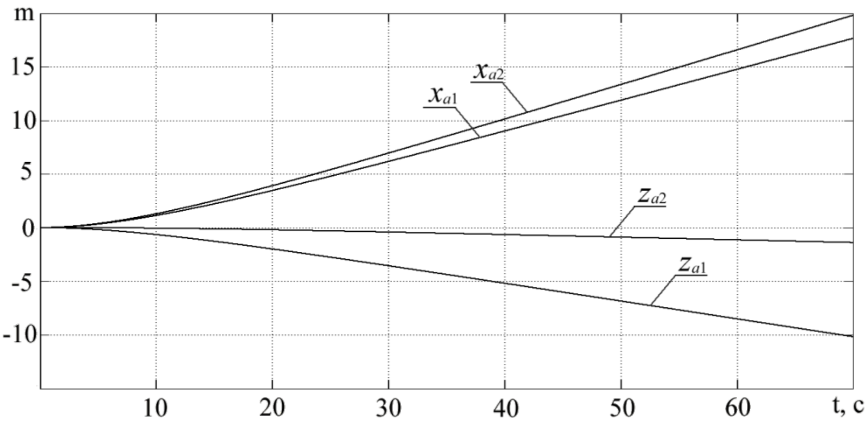


Рис. 2. Линейные перемещения ПА

Из этого рисунка видно, что наличие неучтенного дифферента в процессе движения ПА за 70 с приводит к его незапланированному смещению по оси Z_a на 10м. Использование синтезированной коррекции, формирующей вектор $\tau_p(t)$, позволяет в 6.6 раз уменьшить смещение ПА z_{a2} по оси Z_a от предписанной прямолинейной траектории его движения, но это смещение все равно достигает 1.5м.

Причиной последнего является несимметричность ПА, а также различные значения присоединенных масс жидкости и коэффициентов вязкого трения при его движении по разным степеням свободы.

Если эти незначительные отклонения в процессе движения ПА становятся недопустимыми, то они могут устраняться оператором или автоматически за счет дополнительной коррекции вектора $\tau(t)$. При автоматической коррекции этого вектора целесообразно использовать информацию о текущем направлении $v(t)$, определяемом доплеровским лагом. Ниже будет рассмотрена система, обеспечивающая указанную автоматическую коррекцию вектора $\tau(t)$ с помощью доплеровского лага.

4. Дополнительная автоматическая коррекция вектора тяги ПА

Современные доплеровские лаги позволяют точно определить элементы вектора $v(t)$ в СК $X^*Y^*Z^*$ [8]. При смещении реального направления движения ПА, имеющего ненулевые углы α и γ, от направления, задаваемого в СК $X^*Y^*Z^*$ вектором $\tau_p(t)$, между векторами $v(t)$ и $\tau_p(t)$ возникает ненулевой угол $\varphi = \arccos\left(\frac{\tau_p(t)\, v(t)}{\|\tau_p(t)\|\,\|v(t)\|}\right)$ (см. Рис. 3). Очевидно, что для движения ПА в направлении, определяемом вектором $\tau_p(t)$, его СУ должна обеспечивать обнуление угла φ, формируя новый вектор тяги $\tau_d(t) = \tau_p(t) + \tau_k(t) \neq \tau_p(t)$, лежащий в плоскости, образованной векторами $\tau_p(t)$ и $v(t)$ (см. рис.3), где $\tau_k(t) = k\,\frac{\mu(t)}{\|\mu(t)\|} \in R^3$ - дополнительный вектор тяги, перпендикулярный вектору $\tau_p(t)$, направленный в сторону компенсации угла φ и лежащий в одной плоскости с векторами $\tau_p(t)$, $v(t)$; k – положительный коэффициент, значение которого выбирается экспериментально с учетом конструкции ПА $\mu(t) = \tau_l(t) - v(t) \in R^3$ - вектор, определяющий направление вектора $\tau_k(t)$; $\tau_l(t) = \frac{\tau_p(t)}{\|\tau_p(t)\|}\|v(t)\|\cos\varphi$.

При $\|\mu(t)\| = 0$ СУ ПА формирует $\tau_k(t) = 0$. При $\|\tau_p(t)\| = \|v(t)\| = 0$ угол φ не вычисляется, т.к. ПА не имеет движения.

Блок-схема автоматической следящей системы, обеспечивающей условие φ →0, представлена на Рис. 4.

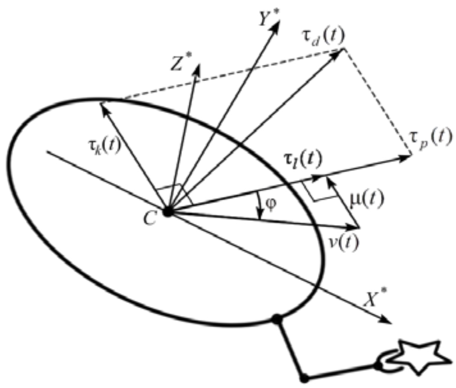


Рис. 3. ПА и скорректированный вектор тяги

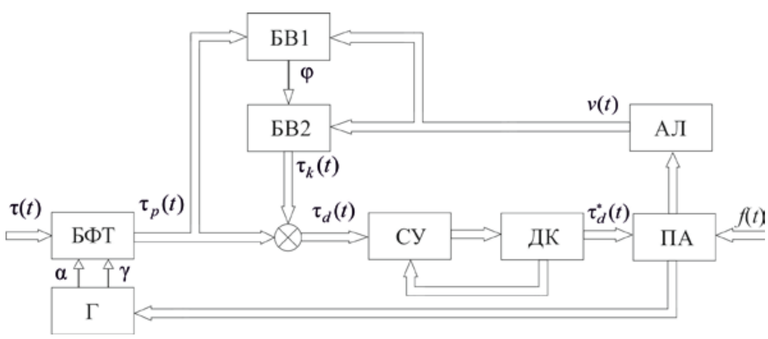


Рис. 4. Обобщенная схема синтезированной системы

На этой схеме введены следующие обозначения: БФТ – блок формирования вектора $\tau_p(t)$ согласно выражению (1); Г – блок гироскопов, измеряющий углы α и γ; АЛ – абсолютный доплеровский лаг; ДК – движительный комплекс ПА; СУ – система управления ДК; БВ1 – блок вычисления угла φ; БВ2 – блок вычисления вектора $\tau_k(t)$; $\tau_d^*(t)$ - реальный вектор тяги, формируемый ДК и воздействующий на ПА в процессе его движения; $f(t) \in R^6$ - вектор внешних силовых и моментных воздействий на ПА, приводящий к появлению ненулевых углов α и γ.

5. Исследование работы системы комплексной коррекции тяг ПА

На Рис. 5 показаны результаты численного моделирования линейного перемещения ПА в горизонтальной плоскости с применением синтезированной комплексной СУ, изображенной на рис.4**,** при условии, что в начале движения и далее он имел неизменяемый дифферент ($\alpha = 30^0$), $k = 2000$, а задающим устройством в СК XYZ формировался желаемый вектор тяги $\tau(t) = [15{,}0{,}0]^T$.

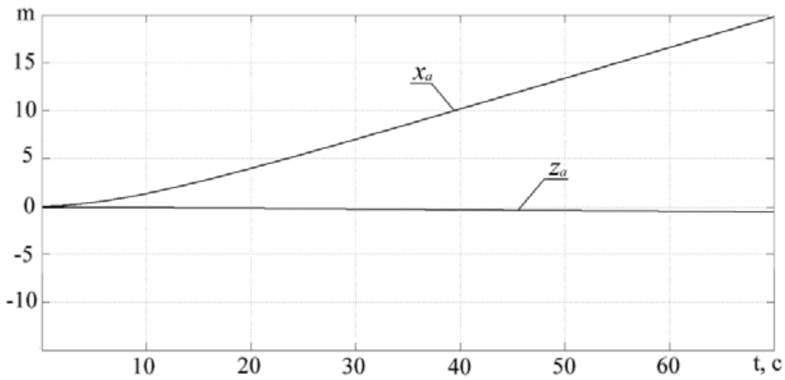


Рис. 5. Моделирование работы комплексной системы коррекции линейных перемещений ПА

Из этого рисунка видно, что даже при наличии большого дифферента ПА достаточно точно движется в горизонтальной плоскости в направлении, определяемом вектором $\tau(t)$. Его отклонение от заданной горизонтальной плоскости через 70 с после начала движения не превышает 0.3 м. Это незначительное отклонение обусловлено зоной нечувствительности при определении величины φ. С учетом полученных результатов моделирования можно утверждать, что использование синтезированной комплексной СУ позволяет автоматически учесть и успешно компенсировать влияние углов дифферента и крена, при движении ПА на его заданное линейное перемещение к цели.

Заключение

В данной работе рассмотрен метод синтеза системы автоматической коррекции линейных перемещений ПА, которая при произвольных отличных от нуля значениях углов его крена и дифферента, автоматически изменяя тяги соответствующих движителей в зависимости от текущих значений указанных углов, неизменно обеспечивает высокоточное перемещение этого аппарата в абсолютной СК в заданном направлении. Разработанная система имеет простую практическую реализацию и не требует установки на ПА дополнительного оборудования и навигационных комплексов.

1. Филаретов В.Ф., Алексеев Ю.К., Лебедев А.В. Системы управления подводными роботами / Под ред. В.Ф. Филаретова. - М.: Круглый год, 2001. 288 с.
2. Филаретов В.Ф., Лебедев А.В., Юхимец Д.А. Устройства и системы управления подводных роботов.- М.: Наука, 2005. 270с.
3. Fossen, T.I. Guidance and control of ocean vehicles, John Wiley & Sons Ltd., 1994, 494 p.
4. Филаретов В.Ф., Коноплин А.Ю. Система автоматической стабилизации подводного аппарата в режиме зависания при работающем многозвенном манипуляторе. Часть 2 // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. №7. С. 29-34.
5. K.S.Fu, R.C. Gonzalez, C.S.G. Lee Robotics: control, sensing, vision and intelligence. McGraw-Hill, 1987. 580p.
6. Фридлендер Г.О., Козлов М.С. Авиационные гироскопические приборы. М. Оборонгиз 1961г., 390с.
7. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М., 1973 г., 832с.
8. Виноградов К.А., Кошкарев В.Н., Осюхин Б.А., Хребтов А.А. Абсолютные и относительные лаги: Справочник. – Л.: Судостроение, 1990г., 264с.

Yu. Moroz

A METHOD OF EXTENDED OBJECTS RECOGNITION FROM SIDE-SONAR SCANS

RTC, Saint-Petersburg, Russia
u.moroz@rtc.ru

Ю.С. Мороз

АЛГОРИТМ РАСПОЗНАВАНИЯ ПРОТЯЖЕННЫХ ОБЪЕКТОВ НА ГИДРОЛОКАЦИОННЫХ СНИМКАХ

ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург
u.moroz@rtc.ru

Развитие подводных линий связи и сетей трубопроводов различного назначения требует разработки оборудования для инспекции и ремонта таких объектов. Современным решением является использование автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА), способных действовать длительное время без непосредственного управления оператором. Поскольку точность навигации АНПА по инерциальным системам и точность априори известных координат объектов ограничены, необходимо разработать алгоритмы полностью автоматического поиска и наведения АНПА на протяженные и точечные подводные объекты различной физической природы. В данном докладе представлено решение задачи поиска протяженных объектов с использованием гидролокаторов бокового обзора (ГБО). С небольшими модификациями алгоритм применим для использования в составе телевизионных систем АНПА.

При анализе ГБО-грамм протяженных объектов типа трубопровод можно выделить несколько характерных признаков: выраженные протяжённые прямолинейные границы; трубопровод представляется в виде двух кривых разной толщины; яркость одной кривой имеет высокое значение относительно других участков изображения (большая амплитуда отраженного сигнала); яркость второй кривой – низкое значение относительно других участков изображения (тень). Одновременно можно выделить ложные объекты, которые имеют схожие характеристики с искомым, такие как выраженный максимум яркости и прямолинейные протяжённые границы. В связи с этим для уменьшения ложных срабатываний следует использовать весь набор характерных признаков.

Предложенный алгоритм использует совокупность классических алгоритмов Кенни (Canny 1986) и Хафа (Компьютерная графика и мультимедиа) для выделения отрезков прямых линий, описывающих искомый объект. Для фильтрации полученных отрезков используется новый метод, основанный на накоплении весов проекций отрезков в специальной матрице-накопителе, аналогичной предложенной в (Ballard 1981). Он позволяет построить отрезки, проходящие вдоль срединных линий трубопроводов, и отбросить ложные объекты, не имеющие характерной гидроакустической структуры.

Полученные отрезки соединяются с учётом близости и направления. Результатом является ломаная линия, описывающая координаты искомого протяженного объекта. В каждой точке могут быть получены смещения относительно текущих координат АНПА и направление касательной к объекту.

Алгоритм работает в реальном масштабе времени и позволяет вычислять поправки по курсу и смещению АНПА относительно целевого протяженного объекта. Он может применяться в двух режимах: поиска протяженного объекта (сканирование местности, например параллельными галсами) и движения вдоль него.

Для реализации второго режима важной особенностью ГБО является построение картины за кормой АНПА. Это существенное отличие от традиционной телевизионной системы учитывается оригинальным образом. По ГБО-грамме строится прогноз положения объекта в виде нормального распределения, применяется модификация (размытие) этого распределения с учётом динамики АНПА, и управление АНПА по направлению и скорости производится таким образом, чтобы оценка положения объекта гарантированно не вышла за границы рабочей зоны ГБО.

Алгоритм определения координат протяженных объектов прошёл отработку на множестве ГБО-записей. В 2015 году запланирована реализация алгоритма в составе АНПА и проведение натурных испытаний.

1. Canny J., A Computational Approach To Edge Detection, IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 8(6):679–698, 1986.
2. Преобразование Хафа // Компьютерная графика и мультимедиа. URL: http://cgm.computergraphics.ru/content/view/36 (дата обращения: 23.11.2014).

3. D.H. Ballard, "Generalizing the Hough Transform to Detect Arbitrary Shapes", Pattern Recognition, Vol.13, No.2, p.111-122, 1981.

I. Shardyko

ON MATHEMATICAL DESCRIPTION OF MANIPULATION SYSTEM FOR THE INSPECTION OF METAL SURFACE OF THEUPPER BLOCK PIPES

RTC, Saint-Petersburg, Russia
ddeer@bk.ru

И.В. Шардыко

ОСОБЕННОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ МАНИПУЛЯЦИОННОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ МЕТАЛЛА ПАТРУБКОВ ВЕРХНЕГО БЛОКА

ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург
ddeer@bk.ru

Введение

Принципиальной задачей строительства и эксплуатации АЭС является обеспечение безопасности. Частной задачей обеспечения безопасности эксплуатации ядерного реактора является проверка верхнего блока (ВБ) корпуса реакторана наличие трещин, царапин и других механических отклонений критических поверхностей методами неразрушающего контроля. Для решения задачи предэксплуатационного и эксплуатационного контроля металла поверхностей и соединений ВБ реактора в ЦНИИ РТК разработана манипуляционная система (МС)[1].

На сегодняшний день задача математического описания роботов в части решения прямой и обратной задач кинематики решена в общем виде, при том существуют решения, основанные на различных подходах[2]. Однако при решении задачи в общем виде достаточно неудобным оказывается процесс настройки вследствие того, что имеющие определённый физический смысл коэффициенты, как правило, сведены в один общий элемент матрицы преобразования (теряется их обособленность). Кроме того, часто задачи движения эффективной точки робота (ЭТР) тесно связаны с определённой системой координат (СК), и для различных задач удобные СК будут отличаться. В связи с приведёнными соображениями, а так же с учётом того, что МС включает лишь пять активных степеней свободы, было принято решение решить задачи ПЗК и ОЗК в частномвиде.

Кинематическая схема МС

Внешний вид МС и кинематическая схема представлены на Рис. 1.Наименования шарниров от основания робота к ЭТР следующие: шарнир рыскания (ШР, 1), шарнир тангажа плеча (ШТП, 2), шарнир тангажа локтя (ШТЛ, 3), шарнир тангажа ИО (ШТ ИО, 4), шарнир крена (ШК, 5).

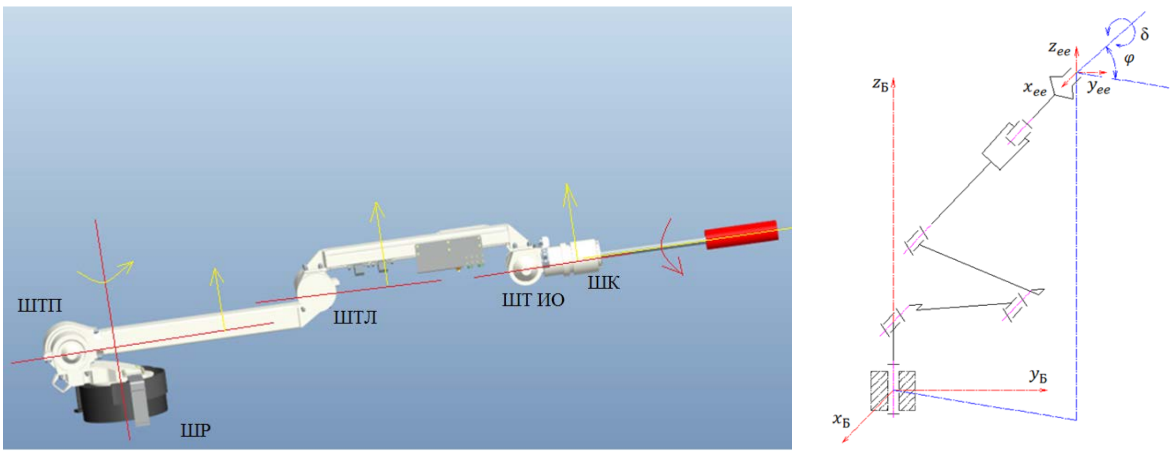


Рис. 1. Внешний вид и кинематическая схема МС

Для описания МС удобно выбрать цилиндрическую СК (ЦСК) с центром, находящимся на оси ШТП и в плоскости, перпендикулярной оси ШТП и проходящей через ось ШК. Такая ЦСК будет являться подвижной при работе ШР, однако это будет учтено при последующих преобразованиях. Положение

ЭТР описывается расстоянием в горизонтальной плоскости от оси ШТП R, высотой в вертикальной плоскости от оси ШТП (вдоль оси ШР) H, углом поворота относительно основания МС α.Что касается углов ориентации ИО, подвижная ЦСК МС дополняется углом наклонаИО к горизонтальной плоскостиφ и углом крена ИО δ.

Таким образом, в лист СК входят: обобщённая СК, связанная с шарнирами МС, и ЦСК МС. Также требуется включить в лист и декартову СК, связанную с крышкой ВБ и обладающую удобством задания целевых точек ЭТР (предоставляется возможность снимать координаты точек непосредственно с чертежа крышки). Однако, вследствие особенностей процесса контроля, МС может быть расположена и ориентирована относительно крышки ВБ различным образом. Для упрощения связи между МС и крышкой ВБ вводитсядекартова СК МС, ось oZкоторой совпадает с осью ШР. Угол наклона ИО для декартовых СК выбирается аналогично подвижной ЦСК, угол крена ИО можно выбрать как аналогично ЦСК, так и связав его начало отсчёта с одной из горизонтальных осей крышки.

Каждая из координат перечисленных четырёх СК имеет определённый физический смысл и представляет интерес для задания траекторий ЭТР.

Связь обобщённой и цилиндрической СК МС

Обобщённая система координат описывается набором углов поворота qкаждого из шарниров МС, индексы соответствуют введённым выше порядковым номерам шарниров. При этом представленные на Рис. 1 положения шарниров соответствуют нулевым значениям угла, направления положительного приращения углов соответствуют указанным стрелкам. Такое положение выбрано вследствие наличия протяжённых горизонтальных поверхностей у звеньев плеча и локтя. Направление положительного приращения обобщённых координат шарниров тангажа – против часовой стрелки, если смотреть на МС как на рисунке 1, ШР и ШК – против часовой стрелки при направлении взгляда сверху вниз.

Зависимость цилиндрических координат МС от обобщённых определяется пятью конструктивными параметрами:

L1 –расстояние между осями ШТП и ШТЛ в направлении, параллельном плечевому звену;

B1 – расстояние между осями ШТП и ШТЛ в направлении, перпендикулярном плечевому звену;

L2 – расстояние между осями ШТЛ и ШТ ИО в направлении, параллельном локтевому звену;

B2– расстояние между осями ШТЛ и ШТ ИО в направлении, перпендикулярном плечевому звену;

L3 – расстояние между осью ШТ ИО и ЭТР. Под ЭТР понимается наиболее удалённая от оси ШТ ИО точка ИО. Величины наглядно показаны на Рис. 2.

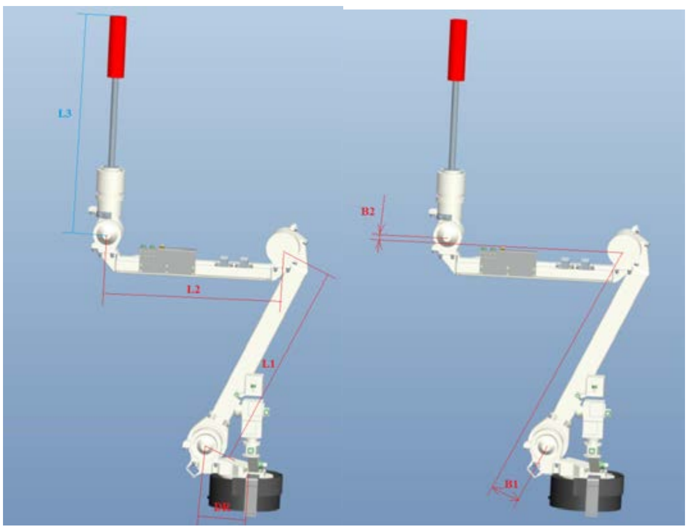


Рис. 2. ОЗК “Обобщённая – цилиндрическая” СК МС

Таким образом, ПЗК решается тривиально, например, высота Н в ЦСК выражается как

$$H = L1 \cdot \sin(q_2) + B1 \cdot \cos(q_2) + L2 \cdot \sin(q_2 + q_3) - B2 \cdot \cos(q_2 + q_3) + L3 \cdot sin(q_2 + q_3 + q_4), \quad (1)$$

а угол наклона ИО как

$$\varphi = q_2 + q_3 + q_4 \tag{2}$$

Для решения ОЗК удобно выбрать другой набор параметров, проиллюстрированный Рис. 3. Вместо L1, B1, L2 и B2 вводятся d1 и d2 – межосевые расстояния ШТП и ШТЛ, ШТЛ и ШТ ИО соответственно; а так же Δq_2 и Δq_3. d1 и d2 определяются через первичный набор параметров по теореме Пифагора, Δq_2 и Δq_3 – малые острые углы соответствующих прямоугольных треугольников, находятся как

$$\Delta q_2 = arctg\left(\frac{B1}{L1}\right), \Delta q_3 = arctg\left(\frac{B2}{L2}\right) \tag{3}$$

Первым шагом решения необходимо избавиться от длины L3и перейти к положению оси ШТ ИО (H_1, R_1). Вводимые переменные проиллюстрированы рисунком 5. В выбранных координатах переход имеет вид:

$$R_1 = R + L3 \cdot \cos(\varphi), \tag{4}$$

$$H_1 = H - L3 \cdot \sin(\varphi) \tag{5}$$

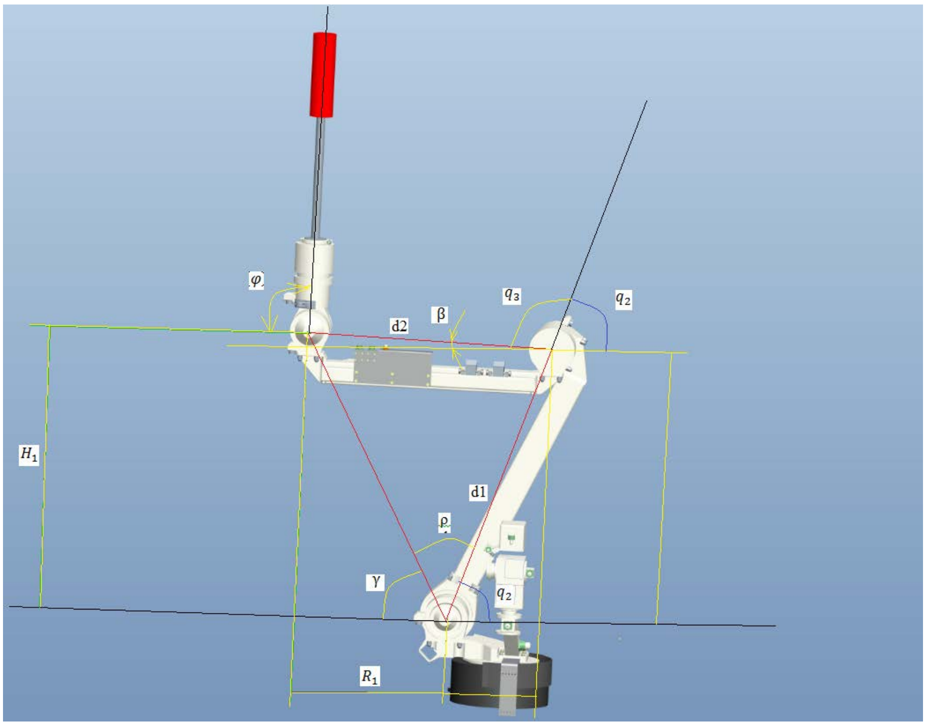


Рис. 3. Обозначения для ОЗК

Параметрγ определяется как

$$\gamma = arctg\left(\frac{H_1}{R_1}\right) \tag{6}$$

Угол q_2 можно выразить как π – ρ – γ. При этом ρ определяется по теореме косинусов из треугольника, образованного сторонами d1 и d2.

Теперь можно определить координаты оси ШТЛ (R_2,H_2)как

$$R_2 = -L1 \cdot \cos(q_2), \tag{7}$$

$$H_2 = L1 \cdot \sin(q_2), \tag{8}$$

и с их помощью определить угол β как

$$\beta = arctg\left(\frac{H_1 - H_2}{R_1 - R_2}\right) \qquad (9)$$

и искомый угол q_3 как $\pi - \beta - q_2$. Тогда q_4 определяется из уравнения (2).

В завершении решения необходимо учесть конструктивные углы Δq_2 и Δq_3.

Приведённые формулы при данном выборе промежуточных углов и расстояний верны для любых возможных конфигураций МС.

Связь цилиндрической и декартовой СК МС

Схема преобразования приведена на Рис. 4. В преобразовании участвуют два конструктивных параметра:

DR – расстояние между осями ШР и ШТП (показано на Рис. 2);

DB – расстояние между осями ШР и ШК в направлении, перпендикулярном осям шарниров тангажа.

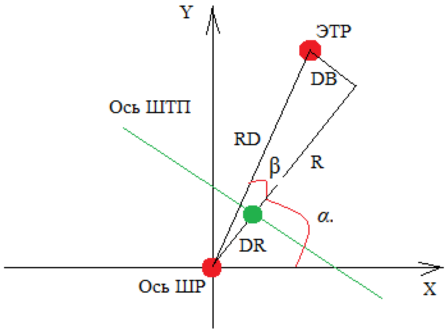


Рис. 4. Преобразование “Полярная-Декартова” СК МС

ПЗК вновь не представляет особенного интереса, ОЗК выполняется в несколько шагов. На первом шаге определяются угол A, являющийся суммой α и β, как

$$A = arctg\left(\frac{y}{x}\right), \qquad (10)$$

где x,y – абсцисса и ордината ЭТР в декартовой СК МС, а также RDпо теореме Пифагора в треугольнике с катетами xи y.

На втором шаге определяются полярный радиус R, промежуточный угол β и искомый α, как

$$R = \sqrt{RD^2 - DB^2 - DR}, \qquad (11)$$

$$\beta = \arcsin\left(\frac{DB}{RD}\right), \qquad (12)$$

$$\alpha = A - \beta \qquad (13)$$

Связь декартовой системы МС и декартовой системы крышки МС

Преобразование выполняется при помощи матрицы поворота и параллельного переноса при повороте вокруг оси oZ и последующего переноса вдоль трёх осей. Значения угла поворота и смещений по осям определяются на этапе настройки МС на рабочем месте.

Учёт гибкости МС

Для учёта угла рассогласования между выходным валом двигателя, приведённым к выходному вала шарнира, и выходным валом шарнира, вводится вектор компенсирующих значений, рассчитываемый через вектор текущих значений момента нагрузки на элементы МС и известные значения коэффициентов упругости элементов (определённые экспериментально). Момент нагрузки в свою очередь рассчитывается через известные массы узлов МС и вектор текущих углов поворота ИШ.Учёт гибкости МС включается в ПЗК и ОЗК.

Заключение

Разработанная в ЦНИИ РТК МС для проведения неразрушающего контроля поверхности металла верхнего блока реактора ВВЭР-1200 обладает кинематической схемой и конструктивным исполнением, минимально сложными и достаточными для выполнения частных задач в рамках глобальной задачи – обеспечения безопасности эксплуатации АЭС. ПЗК и ОЗК МС решены в частном в виде, что снижает время вычислений и повышает удобство настройки МС благодаря физической определённости коэффициентов уравнений. Положение ЭТР МС описывается в четырёх СК, дополнительным следствием чего является возможность задания элементарных движений в каждой из СК. В настоящее время МС изготовлена, настроена и проходит испытания, связанные с повышением точности и расширением функциональности.

1. Р.А. Чижевский, И.В. Шардыко,“Манипуляционная система контроля металла патрубков верхнего блока”, сборник трудов конференции “Экстремальная робототехника (ЭР-2014)”. – СПб.: “ЦНИИ РТК”, 2014 г.
2. К. Фу, Р. Гонсалес, К. Ли “Робототехника”; пер. А.А. Сорокин, А.В. Градецкий, М.Ю. Рачков. – Москва : Мир, 1989. – 621 с.

A. Piscariov, B. Mikhailov

LARGE-DIAMETER PIPLINE JOINT DETECTION ALGORITHM FOR WELDING ROBOT CONTROL

Bauman MSTU, Moscow, Russia
piscariov@gmail.com, robot@bmstu.ru

Introduction

High-pressurepipeinesareincludedinenergysectorandthusareobjectsofstrategic importance. Reliability and operation uptime of pipeline systems significantly influence both petroleum export characteristics and internal consumers operation. Pipeline installation performance also affects raw product cost and delivery amount, implying development rate of the whole pipeline system. As operational parameters directly depend on weld seams quality, pipe welding becomes a major task of pipeline installation.

Currently pipeline welding is performed either manually or by means of operator control. It can be explained by following reasons: firstly, pipeline installation process dows not allow to join separate pipes with micron-accuracy. Next, operation usually goes at the open space under variable conditions: temperature, humidity, lighting conditions etc. It results variance of joint parameters. Some of these problems can be solved by using pipe centering devices, closed buildings at the joint place etc. But in general, welding process still requires a continious control.

So, it's proposed to add a vision system to a welding complex, which will make its control system able to adjust welding parameters depending on joint geometry and external conditions. Such system will allow to reduce human participance in some phases of pipeline installation, also it will lower influence of human factor on weld seams quality and pipeline reliability. Additional advantage is a weld seam quality inspection capabiliy after operation.

In this case a task can be defined by following way: there are two large-diameter pipes (typical value is 1220 mm). Pipes are laid with some inaccuracy, which precludes from applying a welding complex with program control. It's required to develop a vision system, which would allow to recognize and localize a separate joint with respect to installation inaccuracy.

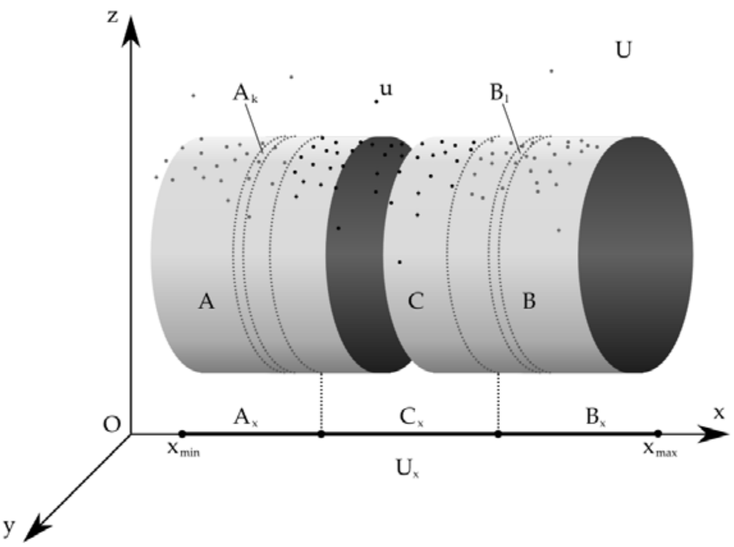
An academic novelty of suggested solution is represented by 3D-vision system, which allows to obtain pipes spatial position and relative placement simultaneously, without taking to real-time scanning or sequential passes, like it's used in laser-camera welding systems. An algorithm, which allows to find relative pipes orientation and joint parameters by using 3D-vision system data, is proposed in the article.

Algorithm

3D-vision system outputs a working scene image as a set of points, each of them has three coordinates. To find joint place, these points must be approximated by surcaces, forming a pipe. During this operation, possible error in point coordinates and arbitrary (in some range) pipes place and orientation must be considered. Also points must be separated from other objects, outliers, measurement errors etc. To simplify the task let's consider the angle between lateral pipe axis and x -axis to be small (pic. 1). Additionally, let's assume that pipes joint is placed closely to center of camera view. It will make easier a recognition of joint in the set of points, forming regular cylinder surface, which will help to find cylinders' axes at the later stage.

Let's denote source set points as , where n is a number of points. Each of points u^i has three coordinates: u_x^i, u_y^i and u_z^i. Camera view is limited, so point coordinates in each axis are contained in intervals: $U_x = [x_{min}; x_{max}]$, $U_y = [y_{min}; y_{max}]$ and $U_z = [z_{min}; z_{max}]$.

Basing on these assumptions, let's split interval U_x into three parts, keeping outer intervals not to contain x -coordinates of joint points. Let's denote outer intervals as A_x and B_x. In general, on can use arbitrary split rules, but to make task easier, we shall split U_x into equal parts, and consequentally, intervals A_x and B_x will equal to $1/3$ of interval U_x. Let's denote pointsets with x -coordinates, containing in these intervals, as A and B. Symbol C denotes inner part of set U, containing joint. This set will be considered later. Cylinder surfaces, points of U and its division into A, B and C are shown on Pic. 1.



Pic. 1. Cylinder surfaces and source points set

Splitting intervals A_x and B_x into K and L parts, we obtain intervlas $A_x^k, k = \overline{1, K}$ and $B_x^l, l = \overline{1, L}$. Similarly, let's denote pointsets with x -coordinates, containing in corresponding intervals, as A^k and B^l. Let's denote points of these sets as a^k and b^k. We shall choose numbering order to make intervals indicies from outer intervals of U_x to inner, i. e. A_x^1 contains boundary point $x_{\min}$, and B_x^1 contains $x_{\max}$.

K and L parameters can be choosen arbitrarily, but due to calculation accuracy requirements they have lower limit, also it's required to keep each subset A_k and B_l to contain enough number of points, which defines upper limit. Division rules also might be any, but to make modelling easier, we shall divide all sets into equal parts, also we assume that K equals L.

A_k and B_l sets will be called as sections. We shall approximate points of these sets by continious curves. To be correct, cylinder surface section in general case is an ellipse, which, more over, has some tilt of axes. Such ellipse equation has very complicated form and finding of its parameters is a quite difficult calculation task. Assuming that pipe is oriented neraly along x axis, we shall consider its section to be close to a circle.

In center-attached coordinate system its equation has a very simple form:

$$\tilde{z}^2 + \tilde{y}^2 = R^2 \qquad (1)$$

$\breve{z}$ and $\breve{y}$ in this equation are variables of local coordinate system, which is obtained by shifing global coordinate system, differently for each section in A and B. In global coordinate system equations have such form:

$$(z - z_a^k)^2 + (y - y_a^k)^2 = (R_a^k)^2$$
$$(z - z_b^l)^2 + (y - y_b^l)^2 = (R_b^l)^2 \qquad 2$$

Here z_a^k and y_a^k are circle center coordinates for k -the section of subset A, z_b^l and y_b^l are the same coordinates for l -the section of subset B.

Let's calculate z_a^k, y_a^k and R_a^k parameters for each k using least squares method. As we have missing coordinate x_a^k, let's assume it to be middle point of interval A_x^k. So, we obtain a center coordinates and circle radiusesset for each section A^k. After we perform same operations on B set, we obtain parameters z_b^l, y_b^l and R_b^l.

One expects that center coordinates are placed at the same line and all radiuses are similar. However, due to source data inaccuracy and higher assumptions, these coordinates have a deviation relatively to expected values. Next stage is to smooth these parameters with Kalman filter. After processing we obtain circle parameters set: $\overline{x}_a^k$, $\overline{y}_a^k$, $\overline{z}_a^k$ and $\overline{R}_a^k$, $k = \overline{1,K}$ and, similarly, $\overline{x}_b^l$, $\overline{y}_b^{kl}$, $\overline{z}_b^l$ and $\overline{R}_b^l$, $l = \overline{1,L}$. As k and l increase, these parameters are close to expected values. So, it's possible to recognize cylinder placement and it's radius.

After algorithm is performed, we obtain canonical equations of two lines (possibly, with no intersection).

$$\frac{x - \overline{x}_a^K}{\overline{x}_a^K - \overline{x}_a^{K-1}} = \frac{y - \overline{y}_a^K}{\overline{y}_a^K - y_a^{K-1}} = \frac{z - \overline{z}_a^K}{\overline{z}_a^K - \overline{z}_a^{K-1}}$$
$$\frac{x - \overline{x}_b^K}{\overline{x}_b^K - \overline{x}_b^{K-1}} = \frac{y - \overline{y}_b^K}{\overline{y}_b^K - y_b^{K-1}} = \frac{z - \overline{z}_b^K}{\overline{z}_b^K - \overline{z}_b^{K-1}} \qquad 3)$$

Also cylinders radiuses R_a and R_b are known. After we obtained these parameters, we can search a joint in C .

As we know cylinders radiuses and axes orientation, we can exclude points of C which do not belong to cylinders. Let's use a distance between point and cylinder surface as a criterion function:

$$r_A(x,y,z) \le \epsilon$$
1. $$r_B(x,y,z) \le \epsilon$$

ϵ parameter can be set externally or calculated empirically by analyzing sections approximation errors. After we performed this procedure forests couple A and C ,and then for B and C ,we obtain point subsets in C ,which are “extensions” of surfaces, approximating points of A and B .Let's denote these subsets as C_A and C_B.

As we know each cylinder parameters and corresponding point sets, we can find cut-off for each pipe and recognize a joint place. Let's construct point quantity distributions for C_A and C_B sets, taking to account points with x -coordinates, which belong to given interval, containing x :

$$F_A(x) = |\{c^a : x - dx \le c_x^a \le x + dx\}|$$
$$F_B(x) = |\{c^b : x - dx \le c_x^b \le x + dx\}| \qquad 4)$$

Here symbol $|\square|$ denotes cardinality of finite set, i. e. number of elements. After we fix some threshold N_α, we obtain boundary coordinates x_A^α and x_B^α for each cylinder, so the number of points outside these bounds is insignificant:

$$x_A^\alpha = \min_{x \in C_x} F_A(x) < N_\alpha$$
$$x_B^\alpha = \max_{x \in C_x} F_B(x) < \alpha \qquad 5$$

Plugging the sepointsincylinder axes equations, we obtain full 3D-coordinates of u_A^α and u_B^α. Each of these points is an intersection of corresponding cylinder with boundary surface. Let's consider a middle point of interval $[u_A^\alpha; u_B^\alpha]$ as a pipes joint surface point.

Let's construct desired joint line as a circle with average radius:

$$\left(y-\frac{y_A^{\alpha}+y_B^{\alpha}}{2}\right)^2+\left(z-\frac{z_A^{\alpha}+z_B^{\alpha}}{2}\right)^2=\left(\frac{R_A+R_B}{2}\right)^2$$

$$x=\frac{x_A^{\alpha}+x_B^{\alpha}}{2}$$

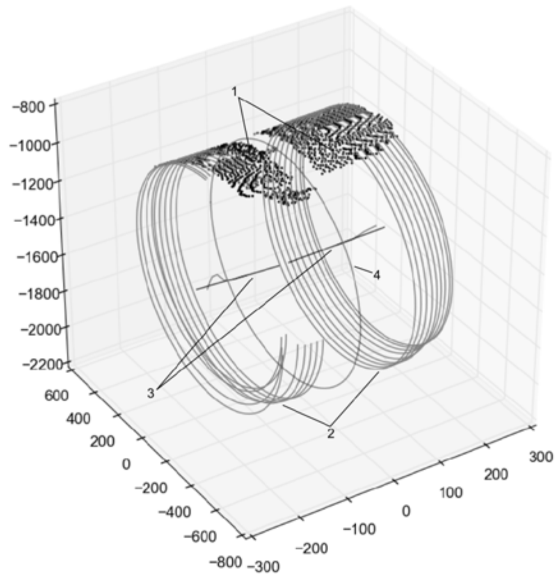
Modelling

To test algorithm sufficiency a Python program was written. Mockup scanning results were used as input data. Calculation results are represented in Table 1:

Table 1: Modelling results

Value	Pipe A	Pipe B
Surface radius, mm	573,71	586,04
Standard deviation, mm	9,63	1,33
Joint circle radius, mm	579,88	

Points (1), obtained after joint mockup scanning, circles (2), which approximate these points in cross-section, resulting cylinders axes (3) and joint circle (4) are shown on Pic. 2. All coordinates are given in millimeters.



Pic. 2. Joint place, pipe sections and axes, obtained after calculations

Conclusion

Accordingtoresultsofthiswork, wecanconcludethatapipelineweldingroboticcomplex “sensitizing” taskcanbesolved.Infurtherplansthisalgorithm can be used to find a joint of real pipeline.Modellingresults, giveninthearticle, prove this conclusion.

1. V. Ilyin, E. Pozdnyak - Analytical geometry: a primer - 5-thed. - M.: Science. Physmathlit, 1999
2. V. Jurevich - Fundamentalsofrobotics - 2-nded. - SPb.: BHV-Peterburg, 2005
3. J. Lynnic - Leastsquaresmethodand fundamentals of mathematical-statistical theory of observations processing - 2-nded. - M.: 1962
4. G. Savinof - Some particularities of optimal filtering Kalman-Bucy algorithm - Aerospace instrumentation engineering, № 6, 2007.
5. J. Volodin, A. Orlov, B. Mikhailov - Calibration of 3D-visionsystem with structured highlight by means of flat objects - Writings of international conference with elements of scientific youth school – SPb: Polytechnics-service, 2010

А.А. Пискарев, Б.Б. Михайлов

АЛГОРИТМ РАСПОЗНАВАНИЯ СТЫКОВ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ СВАРОЧНЫМ РОБОТОМ

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва
piscariov@gmail.com; robot@bmstu.ru

Введение

Магистральные трубопроводы высокого давления входят в состав топливно-энергетического комплекса и являются стратегически важными объектами. Надёжность и бесперебойность работы трубопроводных систем существенно влияет как на показатели экспорта нефти и газа, так и на работу внутренних потребителей. Производительность прокладки нового трубопровода также отражается на себестоимости и объёмах доставки сырья, определяя динамику развития всей трубопроводной системы. Поскольку эксплуатационные параметры трубопровода напрямую зависят от качества сварных швов, сварка труб становится центральной задачей при прокладке трубопровода.

В настоящее время сварка швов магистральных трубопроводов осуществляется вручную либо под контролем оператора. Это объясняется следующими причинами: во-первых, процесс укладки исключает возможность стыковки отдельных труб с микронной точностью. Во-вторых, работа происходит на открытой местности при постоянно меняющихся условиях: температуры, влажности, освещённости и т. п. Результатом становится изменение параметров стыка. Часть этих проблем удаётся решить с помощью приспособлений для центровки труб, закрытых надстроек на месте стыка и т. п. Однако в целом процесс сварки всё же требует постоянного контроля.

Таким образом, сварочный комплекс предлагается дополнить системой технического зрения, сделав его систему управления адаптивной, способной постоянно корректировать параметры сварки в зависимости от геометрии стыка и внешних условий. Такая система позволит снизить долю человеческого участия на отдельных этапах постройки трубопровода и уменьшить влияние человеческого фактора на качество сварных швов и надёжность трубопровода в целом. Дополнительным преимуществом становится возможность контроля качества шва после сварки.

В данном случае задачу можно сформулировать следующим образом: имеются две трубы большого диаметра (один из типовых диаметров для магистрального трубопровода - 1220 мм). Трубы уложены встык с некоторой погрешностью, которая не позволяет применить сварочный комплекс с программным управлением. Требуется разработать систему технического зрения, которая позволила бы обнаружить и локализовать отдельно взятый стык с учётом погрешностей укладки.

Новизна предлагаемого решения заключается в использовании системы объёмного зрения, которая позволяет единовременно получить информацию о пространственном положении труб и их взаимном размещении, не прибегая к сканированию в реальном времени или к последовательным проходам, как это делается в системах, сканирующих место сварки лазернымлучом. В статье предлагается алгоритм, позволяющий на основе данных системы объёмного зрения определить взаимную ориентацию труб и параметры стыка.

Алгоритм

Система объемного зрения выдаёт изображение рабочей сцены в виде множества точек, каждая из которых имеет три координаты. Для того чтобы обнаружить место стыка эти точки необходимо аппроксимировать поверхностями, описывающими трубу. При этом необходимо учитывать возможную ошибку в координатах точек и произвольные (в некоторых пределах) положение и ориентацию труб. Дополнительно нужно отфильтровать точки от посторонних предметов, выбросов, ошибок измерения и т. п. Для упрощения задачи будем считать, что угол между продольной осью трубы и осью x небольшой (Рис. 1). Дополнительно предположим, что стык труб находится близко к середине поля зрения камеры. Это упростит его выделение в общей массе точек, которые формируют правильную цилиндрическую поверхность, что в дальнейшем поможет найти оси цилиндров.

Обозначим точки исходного множества за , где n - количество точек. Каждая из точек u^i имеет три координаты: u^i_x,u^i_y и u^i_z. Поле зрения камеры ограничено, и координаты точек по каждой из осей принадлежат отрезкам: $U_x = [x_{min}; x_{max}]$, $U_y = [y_{min}; y_{max}]$ и $U_z = [z_{min}; z_{max}]$.

Основываясь на допущении о расположении шва, разделим отрезок U_x на три части таким образом, чтобы в крайних отрезках не содержались x - координаты точек, формирующих стык. Обозначим крайние отрезки, как A_x и B_x. В общем случае, критерии выделения множеств могут быть произвольными, однако для простоты задачи мы используем разбиение U_x на равные части, и соответственно, отрезки A_x и B_x будут равны $1/3$ части отрезка U_x. Множества точек, x - координаты которых попадают в эти отрезки, обозначим, как A и B . Символом C обозначим среднюю часть множества U , содержащую стык, к которой мы вернёмся позже. Цилиндрические поверхности, точки множества U и его разбиение на подмножества A ,B и C наглядно изображены на Рис. 1.

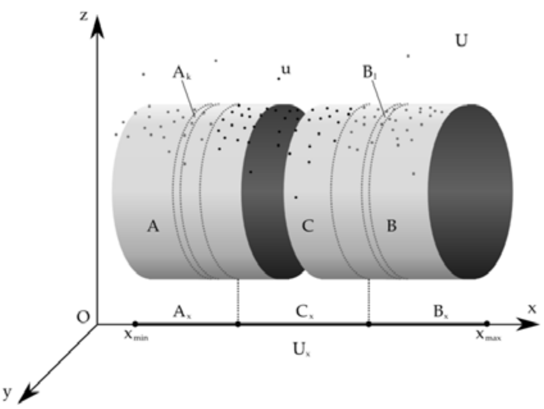


Рис. 1. Цилиндрические поверхности и множество исходных точек

Разделив отрезки A_x и B_x наK и L частей соответственно, получим отрезки $A^k_x, k = \overline{1, K}$ и $B^l_x, l = \overline{1, L}$.

Аналогично, обозначим за A^k и B^l множества точек, x - координаты которых попадают в соответствующие отрезки. Точки, формирующие эти множества, обозначим за a^k и b^k.Порядок нумерации выбираем так, чтобы индексы отрезков возрастали от края U_x к центру, то есть, A^1_x содержит граничную точку $x_{\min}$□, а B^1_x - точку $x_{\max}$□.

Параметры K и L выбираются произвольно, однако ограничены снизу требованиями к точности вычислений, а сверху - требованием к наличию в каждом подмножестве A_k и B_l достаточного количества точек. Разбиение может быть произвольным, однако для простоты моделирования используем разбиение на равные части, а K принимаем равным L .

Множества A_k и B_l назовём сечениями трубы и апроксимируем точки, входящие в эти множества, непрерывной кривой. Строго говоря, сечение цилиндрической поверхности, расположенной под произвольным углом, является эллипсом, который, к тому же, имеет произвольный наклон осей. Уравнение такого эллипса имеет достаточно сложный вид, и поиск его параметров представляет собой непростую вычислительную задачу. В силу допущения о том, что труба ориентирована практически вдоль оси x, сечение цилиндрической поверхности считаем близким к окружности.

В системе координат, связанной с центром окружности, её уравнение имеет достаточно простой вид:

$$\tilde{z}^2 + \tilde{y}^2 = R^2$$

В этом уравнении $\tilde{z}$ и $\tilde{y}$ - переменные в локальной системе координат, которая отличается от исходной смещением центра, различным для каждого сечения в A и B .После перехода к исходным координатам уравнения становятся такими:

$$(z - z_a^k)^2 + (y - y_a^k)^2 = (R_a^k)^2$$
$$(z - z_b^l)^2 + (y - y_b^l)^2 = (R_b^l)^2$$

Здесь z_a^k и y_a^k - координаты центра окружности для k -го сечения подмножества A ,z_b^l и y_b^l - аналогичные координаты для l -го сечения множества B .

С помощью метода наименьших квадратов вычислим для каждого k параметры z_a^k ,y_a^k и R_a^k. В качестве недостающей координаты x_a^k возьмём середину отрезка A_x^k. Таким образом, получаем набор координат центра и радиусов окружности для каждого сечения A^k. Аналогичную процедуру проделываем над множеством B , получив параметры z_b^l ,y_b^l и R_b^l.

Естественно ожидать, что координаты центров в пределах цилиндрического участка трубы расположены на одной прямой, а радиусы всех сечений равны. Однако из-за неточности исходных данных и принятых допущений эти координаты имеют разброс относительно ожидаемых величин. Следующим этапом становится сглаживание этих параметров фильтром Калмана. После обработки фильтром получаем набор параметров окружностей: $\overline{x}_a^k$,$\overline{y}_a^k$,$\overline{z}_a^k$ и $\overline{R}_a^k$, $k = \overline{1, K}$ и, аналогично, $\overline{x}_b^l$,$\overline{y}_b^{kl}$,$\overline{z}_b^l$ и $\overline{R}_b^l$, $l = \overline{1, L}$. Для достаточно больших k и l эти параметры близки к ожидаемым.Таким образом, можно определить расположение оси цилиндра и его радиус.

Результатом работы алгоритма являются канонические уравнения двух прямых (возможно, непересекающихся).

$$\frac{x - \overline{x}_a^K}{\overline{x}_a^K - \overline{x}_a^{K-1}} = \frac{y - \overline{y}_a^K}{\overline{y}_a^K - y_a^{K-1}} = \frac{z - \overline{z}_a^K}{\overline{z}_a^K - \overline{z}_a^{K-1}}$$
$$\frac{x - \overline{x}_b^K}{\overline{x}_b^K - \overline{x}_b^{K-1}} = \frac{y - \overline{y}_b^K}{\overline{y}_b^K - y_b^{K-1}} = \frac{z - \overline{z}_b^K}{\overline{z}_b^K - \overline{z}_b^{K-1}}$$

Также известны радиусы цилиндров R_a и R_b. Имея эти параметры, мы можем приступить к поиску стыка во множестве C .

Зная радиус и ориентацию осей цилиндров, исключаем из множества C точки, не принадлежащие им. В качестве критерия воспользуемся функцией расстояния от точки до цилиндра:

$$r_A(x, y, z) \le \epsilon$$
$$r_B(x, y, z) \le \epsilon$$

Параметр ϵ можно задавать как внешний или вычислить эмпирически, анализируя отклонения, полученные при апроксимации сечений. Выполнив эту процедуру поочерёдно для пары множеств A и C , а затем для пары B и C , мы получаем подмножества точек, в C , которые являются “продолжением” поверхностей, заданных точками в цилиндрах A и B .Обозначим эти подмножества символами C_A и C_B.

Имея параметры каждого из цилиндров и соответствующие им множества точек, определяем срез каждой трубы и выделяем место стыка. Для множеств C_A и C_B построим распределения количества точек, -координата которых попадает в заданный отрезок, включающий x :

$$F_A(x) = |\{c^a : x - dx \le c_x^a \le x + dx\}|$$
$$F_B(x) = |\{c^b : x - dx \le c_x^b \le x + dx\}|$$

Здесь символом $|\square|$ обозначена мощность конечного множества, т. е. количество элементов. Выбрав некоторый пороговый уровень N_α, получаем граничные координаты x_A^α и x_B^α для каждого из цилиндров, за пределами которых находится незначимое количество точек:

$$x_A^\alpha = \min_{x \in C_x} F_A(x) < N_\alpha$$
$$x_B^\alpha = \max_{x \in C_x} F_B(x) < \alpha$$

Подставив эти точки в уравнения осей цилиндров, получаем полные трёхмерные координаты точек u_A^α и u_B^α. Каждая из этих точек является точкой пересечения оси соответствующего цилиндра с граничной плоскостью. Середину отрезка $[u_A^\alpha; u_B^\alpha]$ будем считать точкой, через которую проходит плоскость стыка труб.

Искомую линию стыка построим в этой плоскости в виде окружности усреднённого радиуса:

$$\left(y - \frac{y_A^\alpha + y_B^\alpha}{2}\right)^2 + \left(z - \frac{z_A^\alpha + z_B^\alpha}{2}\right)^2 = \left(\frac{R_A + R_B}{2}\right)^2$$
$$x = \frac{x_A^\alpha + x_B^\alpha}{2}$$

Моделирование

Для проверки адекватности алгоритма была написана программа на Python. В качестве входных данных использовались результаты сканирования макета, имитирующего стык цилиндрических поверхностей. Результатывычисленийпредставлены в Таблице 1

Таблица 1: Результатымоделирования

Величина	Труба A	Труба B
Радиус поверхности, мм	573,71	586,04
СКО, мм	9,63	1,33
Радиус окружности стыка, мм	579,88	

На Рис. 2 изображены точки(1), полученные в результате сканирования макета стыка, окружности (2), аппроксимирующие эти точки в поперечном сечении, полученные оси (3) цилиндров и окружность (4), описывающая стык. Все координаты указаны в миллиметрах.

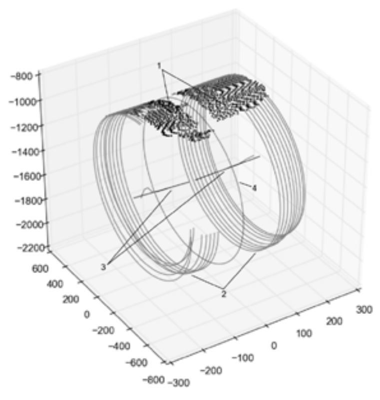


Рис. 2. Место стыка, сечения и оси трубы, полученные в результате вычислений

Заключение

По итогам проделанной работы можно заключить, что задача “очувствления” робототехнического комплекса для сварки магистральных трубопроводов может быть решена. В дальнейшем этот алгоритм планируется использовать для поиска стыка настоящего трубопровода. Приведенные в статье результаты моделирования подтверждают этот вывод.

1. Ильин В. А., Позднян Э. Г. - Аналитическая геометрия: учебник для вузов - 5-е изд. - М.: Наука. Физматлит, 1999
2. Юревич В. И. - Основы робототехники - 2-е изд., перераб. и доп. - СПб.: БХВ-Петербург, 2005
3. Линник Ю. В. - Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений - 2-е изд. - М.: 1962
4. Савинов Г. Ф. - О некоторых особенностях алгоритма оптимальной фильтрации Калмана-Бьюси - Авиакосмическое приборостроение, № 6, 2007 г.
5. Володин Ю. С., Орлов А. В., Михайлов Б. Б. - Калибровка системы трехмерного зрения со структурной подсветкой при помощи плоских объектов - Труды международной конференции с элементами научной школы для молодежи – СПб: Политехника-сервис, 2010

E. A. Devyateriko, B. B. Mikhailov

USING OF VISUAL ODOMETER DATA FOR AUTOMATIC MOBILE ROBOT RETURN IN ENVIRONMENTS WITHOUT FIXED LANDMARKS

Bauman MSTU, Moscow, Russia
retegor@mail.ru, robot@bmstu.ru

The paper presents mobile robot control system for automatic returning to operator with using of visual odometry data fused with inertial sensor data. The paper consists of equations for real time visual odometry accuracy estimation for sensor fusion purposes. Visual odometry is a path recovering approach based on computer vision and calculating of surroundings keypoints flow. The keypoints data comes from image sequence processing. Such system capable of working in unprepared nondeterministic environment and wheels slipping insensitive.

Introduction

For radio-controlled mobile robots operating within extreme circumstances of cramped visibility, uncharted areas, connection delay and miss it’s necessary to apply system of autonomous returning to operator. The position and course estimation system is necessary to solve this task. Under extreme conditions when there are no absolute reference points, beacons or other stationary landmarks traditionally used sensors like encoders, GPS, inertial sensors or rangefinders does not always provide enough accurate location for automatic mobile robot return. The alternative approach is autonomous self path recovering based on computer vision – visual odometry. Visual odometry method [1, 2, 3] is based on calculating of surroundings keypoints flow. The keypoint data comes from stereo-image sequence processing. Visual odometry is relative navigation method so it does not require any fixed landmarks. We made the prototype of visual odometer and tested it for working ability, accuracy and performance in [4]. We performed simulation of mobile robot with visual odometer position feedback, designed and implemented such robot control system in [5, 6], we tested it for working ability and accuracy. We implemented automatic mobile robot return algorithm in [7]. In this paper we set and solved following tasks:

1. to implement mobile robot control system for automatic returning to operator with using of visual odometry data fused with inertial sensor data;
2. to implement algorithm for real time visual odometry accuracy estimation for sensor fusion purposes.

Mobile robot control system with automatic returning ability based on visual odometry

Fig. 1 shows the control system that was implemented to solve 1st task o this paper:

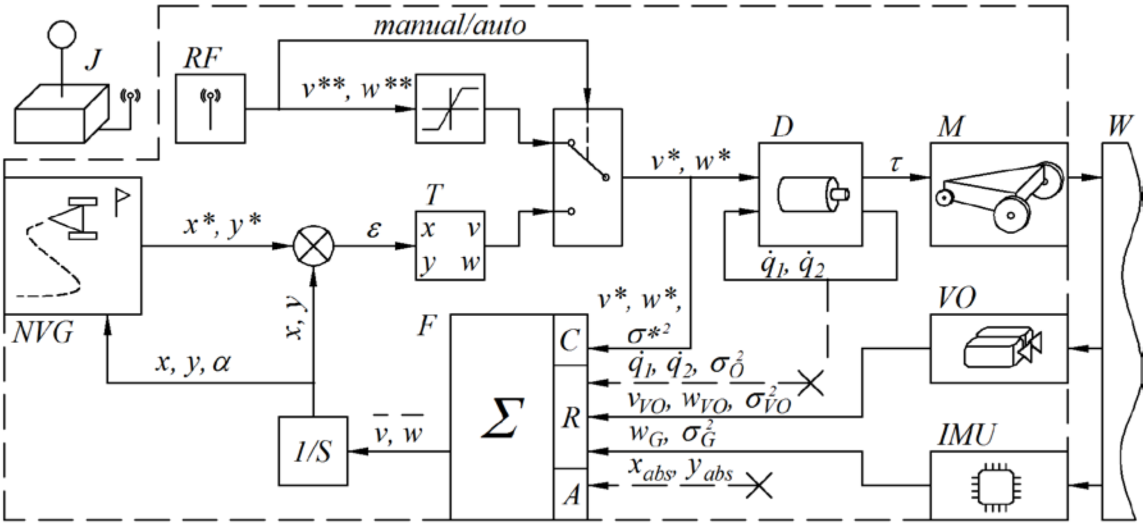


Fig. 1. Mobile robot control system with automatic return ability.

In the normal mode named *"manual"*, operator controls mobile robot remotely using radio joystick *J* setting linear velocity *v*** and angular velocity *w***. This signals are received by robot through transceiver *RF* and routed into drive control subsystem *D*. Unit *D* transforms control signals *v** and *w** into the angular velocities of drives. There is local angular velocities $\dot{q}_1$ and $\dot{q}_2$ feedback at drive control subsystem *D*. Drives torques τ make robot chassis *M* move. Using stereo images of working space *W* visual odometer *VO* recovers linear and angular velocities of robot v_{VO} and w_{VO} as well as it estimates self variance σ_{VO}^2. Inertial subsystem *IMU* gives angular speed w_G and estimation of its variance σ_G^2. Sensor fusion unit *F* with using of sensor variance estimations merges visual odometry *VO* and inertial sensor *IMU* data. Relative navigation sensors are united in *R* group. Control signals *C*: *v** and *w** with model variance σ^{*2} are took into account too. Absolute navigation data x_{abs} and y_{abs} (e. g. GPS data) and wheel odometry are not used. Fusion *F* outputs average estimations of linear and angular velocities $\bar{v}$ and $\bar{w}$, that are integrated to obtain current coordinates of mobile robot *x*, *y* and its yaw angle α. Autonomous navigation unit *NVG* saves robot trajectory data with using of algorithm presented in [7], removing loops and noise.

In case of radio connection lost or alarm signal pass transceiver *RF* switches the system into *"auto"* mode in which robot returns to operator automatically using stored trajectory date. In *"auto"* mode navigation unit *NVG* outputs target coordinates *x** and *y** of previous trajectory point remote from the robot to a fixed distance. This point floats along trajectory together with the robot. Tactical control unit *T* converts current/target coordinates difference into linear and angular velocity.

Visual odometer data accuracy estimation

Visual odometry is stochastic task with data containing transient noise. So it is necessary to estimate its variance in real time for proper sensor fusion. The following factors affecting visual odometer accuracy and noise were reviewed:

1. Conditioning of linear least squares problem (LLSP) of solved system of linear equations (SLE).
2. Feature points tracking accuracy.
3. Left/right camera capture time mismatch.
4. Number of feature points.

For sensor fusion purposes the visual odometry variance was estimated in the following form:

$$\sigma_{VO}^2 = \sigma_{VO\_0}^2 k_\chi k_Z k_\omega k_n,$$

where $\sigma_{VO\_0}^2$ – experimentally obtained constant representing some basic, $k_\chi, k_Z, k_\omega, k_n$ – factors, responsive to conditioning, feature point distances, angular speed and number of feature points.

Conditioning. After detecting and tracking of feature points that could be reliably distinguished visual odometry one get array of points coordinates at current and previous point of time. Visual odometry task is to estimate mobile robot movement using this arrays. For that the robot movement is represented as affine transform. Coordinates of *i-th* feature point with respect to the robot C_i and P_i at the current and previous point of time in case of 2D navigation are related following way [4]:

$$C_i = RP_i + T \quad <=> \quad \begin{pmatrix} X_i^C \\ Z_i^C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c & s \\ -s & c \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_i^P \\ Z_i^P \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} dX \\ dZ \end{pmatrix}$$

where $c = \cos(\alpha)$ and $s = \sin(\alpha)$, α - yaw angle of robot; it is necessary to recover rotation matrix R and translation matrix T of the robot. If one require to obtain only translation dZ and yaw angle α, then $dX = 0$ and only one point data is required for solutionи. The point engenders 2 equations with 3 variables, one of tha could be excluded with substitution of $s^2 = 1 - c^2$. Such task is well conditioned and LLSP turns into calculation of arithmetic mean of independent solutions. If it is necessary to obtain side movement of dX then we need 2 points for solution. In such case we deal with overdetermined SLE $Ax = b$, where:

$$A = \begin{pmatrix} X_1^P & Z_1^P & 1 & 0 \\ Z_1^P & -X_1^P & 0 & 1 \\ X_2^P & Z_2^P & 1 & 0 \\ -X_2^P & Z_2^P & 0 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -X_N^P & Z_N^P & 0 & 1 \end{pmatrix}, \qquad x = (c, s, dX, dZ)^T, \qquad b = \left(X_1^C, Z_1^C, X_2^C, Z_2^C, \dots, X_n^C, Z_n^C\right). \tag{1}$$

In this case the relative position of points dramatically affects solution accuracy. It should be taken into account in case of filtering or sensor fusion. Solution sensitivity to data perturbations could be considered under the cope of condition numbers $\chi(A)$ [8]. From the definition of condition number the SLE solution sensitivity δx depends on input data perturbation δA following way:

$$\frac{\|\delta x\|_2}{\|x_0\|_2} \le \chi(A)\frac{\|\delta A\|_2}{\|A\|_2} + O\left(\frac{\|\delta A\|^2}{\|A\|^2}\right).$$

For overdetermined SLE solved with least squares it is trivial to transform it into determined: $(A^T A)x = A^T y$ and then solve and analize it like determined SLE. After some transformations we can obtain condition number equation for this case [8]:

$$\chi(A) \le \left(\frac{\|r_0\|_2}{\|x_0\|_2 \sigma_{min}} + 1\right) k_2 = \frac{\|r_0\|_2}{\|A\|_2 \|x_0\|_2} k_2^2 + k_2,$$

where $k_2 = \sigma_{max}/\sigma_{min}$ – spectral condition number of A, σ_{max}, σ_{min} - maximum and minimum singular values of A, $r_0 = b - Ax_0$ – residual of LLSP, x_0 – solution of LLSP. Some authors e. g. [9] observe that solution is sensitive to k_2^2, only if r_0 is much higher than Ax_0, and presented estimation of condition number is appeared overvalued in practice. There where analyzed over 10 different approaches of condition number estimation in [8]. It observed that all methods proved are not contrary to each other and provide more or less tight estimations. The following equation was proposed as present consensus:

$$\chi(A) = \left(\frac{\|r_0\|_2^2}{\|x_0\|_2^2 \sigma_{min}^2} + 1\right)^{\frac{1}{2}} \frac{\|A\|_F}{\sigma_{min}},$$

where σ_{min} - minimum non-zero singular value of A, $\|A\|_F$ – Frobenius norm.

The following factor was put into visual odometer variance estimation:

$$\sigma_{VO}^2 \sim \frac{(\chi(A))^2}{k_{\chi 0}} = \left(\frac{\|r_0\|_2^2}{\|x_0\|_2^2 \sigma_{min}^2} + 1\right)\left(\frac{\|A\|_F}{\sigma_{min}}\right)^2 / k_{\chi 0} = k_\chi, \qquad k_{\chi 0} = const.$$

Feature point distance. 3D coordinates of feature points $A(X,Y)$ in robot coordinate system are obtained from their 2D coordinates on images x [10]. Inaccuracies of feature detection and tracking algorithms Δx affects 3D coordinates inaccuracies $A'(X + \Delta X, Z + \Delta Z)$ shown in Fig. 2 a.

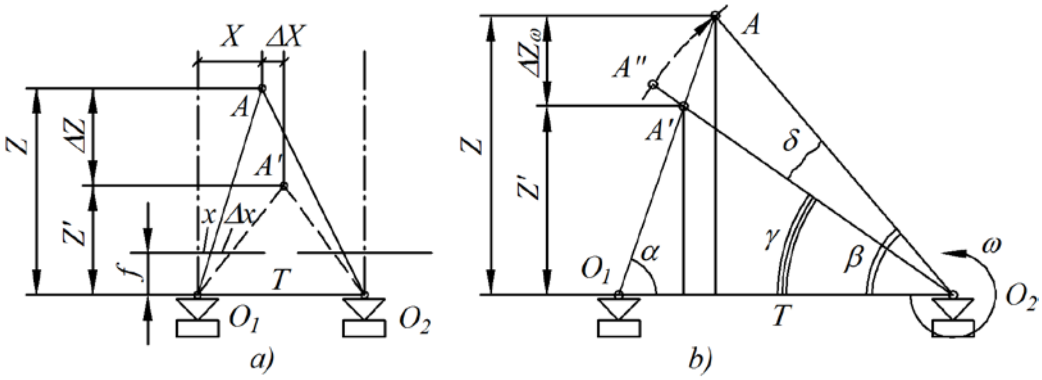


Fig. 2. Inaccuracies of feature points 3D coordinates, a) – affected by long distance, b) – affected by high angular speed.

Differentiating equation in [10] we could obtain relation of 3D coordinates inaccuracy to distance:

$$\Delta X(\Delta x, Z) = \Delta x \cdot Z/f, \qquad \Delta Z(\Delta x, Z) = 2\Delta x \cdot Z^2/(fT),$$

where f – focus distance of cameras.

Perturbation matrix norm $\|\delta A\|_2$ for LLSP (1):

$$\|\delta A\|_2 = \sqrt{\sum 2\Delta X_i^2 + 2\Delta Z_i^2 + 2} = \sqrt{2(\Delta x/f)^2 \sum Z_i^2 (1 + Z_i^2/T^2)}$$

The following factor was added into visual odometrer variance estimation:

$$\sigma_{VO}^2 \sim \|\delta A\|_2^2 \sim \left(\sum_{i=1}^{n} Z_i^2 \left(1 + \frac{Z_i^2}{T^2}\right)\right)/k_{Z0} = k_Z,$$

where k_{Z0} – experimentally obtained constant.

Left/right camera capture time mismatch. After geometric calculations shown in Fig. 2b it was observed in [4] that capture time mismatch of left and right cameras in stereo pair dramatically affects feature point distance recovering accuracy. This inaccuracy highly depends on robot angular speed and should be taken into account. For simplicity we introduced 2 constrains: a) Point distance Z is at least 3 times higher than stereo base T: $Z \geq 3T$. So camera rotation around each point inside stereo base could be approximately represented as rotation around one of cameras. b) Horizontal angle of camera view is less than $90°$: $-\pi/4 \leq \alpha, \beta, \gamma \leq \pi/4$. It allowed us to approximate tangent function by Taylor series with 23% accuracy.

Solving triangles $O_1 O_2 A$ and $O_1 O_2 A'$, we obtained distance inaccuracy:

$$\Delta Z_\omega = Z - T\frac{\tan\alpha \tan\gamma}{\tan\alpha + \tan\gamma}, \qquad Z = T\frac{\tan\alpha \tan\beta}{\tan\alpha + \tan\beta}, \qquad \gamma = \beta - \delta = \beta - \omega\Delta t$$

Replacing tangent with Taylor series, substituting equation for γ, after some transformation we got:

$$\frac{\Delta Z_\omega}{Z} = \frac{\alpha}{\beta} \times \frac{\omega \Delta t}{\alpha + \beta - \omega\Delta t} \approx \frac{\alpha}{\beta} \times \frac{\Delta t}{\alpha + \beta} \times \omega \implies \frac{\Delta Z_\omega}{Z} \sim \omega.$$

Using $Z \geq 3T$ we can remove $\omega\Delta t$ because $\alpha + \beta \gg \delta$, т. е. $\alpha + \beta \gg \omega\Delta t$. Since $\Delta X_\omega \ll \Delta Z_\omega$, ΔX_ω is lef out in perturbation matrix. One more factor was added into variance equation:

$$\sigma_{VO}^2 \sim (\Delta Z_\omega / Z)^2 \sim \omega^2/\omega_0^2 = k_\omega$$

Number of features. Number of input data in experiment like e. g. number of feature points affects its mean value variance according probability theory rules. Usually every data point of experiment $p_1, \dots, p_n$ is considered to be independent with same variance $\sigma_{VO}^2(p)$. Then variance of mean value is:

$$\sigma_{VO}^2(\overline{p}) = \sigma_{VO}^2\left(\frac{p_1}{n} + \dots + \frac{p_n}{n}\right) = \frac{1}{n^2}\left(\sigma_{VO}^2(p_1) + \dots + \sigma_{VO}^2(p_n)\right) = \frac{1}{n^2} n \sigma_{VO}^2(p) = \frac{\sigma_{VO}^2(p)}{n}.$$

For simplicity we took the same equation for LLSP and added following factor in variance estimation:

$$\sigma_{VO}^2 \sim n_0/n = k_n, n_0 = const.$$

Experimental test of automatic return system

Presented control system for automatic mobile robot return to operator with using of visual odometer data, visual odometer accuracy estimation and fusion algorithms were implemented and set on mobile robot previously used in [4] for experimental tests. To increase yaw angle recovering accuracy we implemented fusion of gyroscope sensor data α_G and visual odometer data α_{VO} with using of following equation:

$$\overline{\Delta\alpha} = \left(\frac{\sigma_G^2}{\sigma_{VO}^2 + \sigma_G^2}\right)\Delta\alpha_{VO} + \left(\frac{\sigma_{VO}^2}{\sigma_{VO}^2 + \sigma_G^2}\right)\Delta\alpha_G$$

InvenSense MPU6050 with MEMS gyroscope inside was used as inertial sensor. For visual odometry we applied Russian stereo camera "Sybo Tech LLC" with OmniVision OV7725 matrices, 640x480 pix., 30 FPS, synchronization with 1 ms accuracy, 120 mm base. Stereo camera was set at 500 mm height with 10° tilt, gyroscope was set on camera. Experiment was carried out in 2 stages. In the 1st stage robot in «*manual*» mode moved from start point *Start* (Fig. 3) to end point *R* under hand control of operator that lead robot through the contingent route near points C_1 and C_2, marked on the floor; total route length $S \approx 10\,m$, there were $30°, 60°\ and\ 90°$ turns.

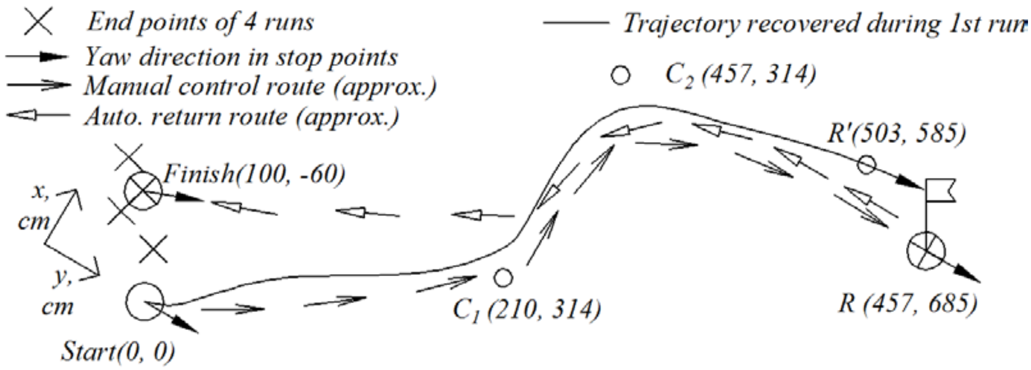


Fig. 3. Robot movements in manual and automatic control modes

Control system stored trajectory using visual odometry and inertial sensor data with using of algorithm presented in [7]. Obtained trajectory is shown by solid line, estimated by navigation stop point is marked by R'. The data of visual odometer $\Delta\alpha_{R'VO}$, data of gyroscope $\Delta\alpha_{R'G}$ and fused $\alpha_{R'}$ were saved for analysis. In the 2nd stage robot automatically returned from point R to start point and actually arrived to point *Finish.* 4 runs were repeated. Table 1 shows results of 4 runs.

Table 1. Experiment results.

Run	*R', cm*	$\Delta\alpha_{R'}$,°	$\Delta\alpha_{R'VO}$,°	$\Delta\alpha_{R'G}$,°	*Finish, см*	$\lvert Finish\rvert/S,\%$
1	(503, 585)	1	-5	6	(100, -60)	12
2	(445, 605)	3	4	4	(70, -69)	10
3	(500, 620)	3	-6	4	(32, -50)	6
4	(575, 580)	7	12	6	(110, -100)	15

The table shows that implemented control system with visual odometer [4, 5] with using of trajectory approximation and saving algorithm from [7] and sensor fusion approach proposed in this paper is capable of automatic returning of mobile robot to operator in case of radio connection lost with average accuracy 11% of total trajectory length. Table 1 shows that the data of visual odometry and gyroscope sensor fusion is more accurate that data of separate sensors. It confirms the efficiency of proposed visual odometry accuracy estimation approach.

Conclusion

Mobile robot control system for automatic returning to operator with using of visual odometry data fused with inertial sensor data and with using of path approximation algorithm from [7] was implemented during the work. Experiment results show that in case of radio control lost this system is capable of automatic robot returning to operator with average accuracy 11% of total trajectory length. Also algorithm for real time visual odometry accuracy estimation for sensor fusion purposes was implemented. Experiment shows that this algorithm allows to obtain more accurate coordinate information with using of visual odometer and gyroscope sensor fusion then separate data of this sensors. Thus it was found that it is possible to increase mobile robot automatic return system accuracy in environments without stationary landmarks with using of visual odometer and proposed algorithms.

1. Jin Xu, Minyi Shen, Weiqiang Wang, Li Yang, Jilin Liu, Igor Kalyaev, «Robust stereo visual odometry for autonomous rover», 6th WSEAS International Conference on Signal, Speech and Image Processing. 2006;
2. David Nist´er, Oleg Naroditsky, James Bergen, «Visual odometry for ground vehicle appli-cations». Journal of Field Robotics, Volume 23(1). 2006. Pp. 3-20.
3. Davide Scaramuzza and Friedrich Fraundorfer, Visual Odometry [Tutorial], Robotics & Au-tomation Magazine, Volume:18, Issue: 4. 2011. Pp. 80 – 92.
4. Devyaterikov E. A., Mihaylov B. B. «Vizualnyiy odometr». Vestnik MGTU im. N. E. Baumana. Ser. Priborostroenie. 2012. Spets. vyip. #6. S. 68-82.;
5. Devyaterikov E. A., Mihaylov B. B. «Sistema upravleniya dvizheniem mobilnogo robota s vizualnyim odometrom». Nauchno-tehnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politehnicheskogo universiteta. Ser. «Informatika. Telekommunikatsii. Upravlenie». 2013. Vyip. #5(181). S. 103-108.
6. Devyaterikov E. A., Mihaylov B. B. «Ispolzovanie dannyih vizualnogo odometra v sisteme upravleniya mobilnogo robota». Ekstremalnaya robototehnika 2012;

7. Devyaterikov E. A., Mihaylov B. B. «Algoritm avtomaticheskogo vozvrascheniya mobilnogo robota po dannyim vizualnogo odometra». Ekstremalnaya robototehnika 2014;
8. Joseph F. Grcar, «Optimal Sensitivity Analysis of Linear Least Squares», Lawrence Berkeley National Laboratory report LBNL-52434, 2002.
9. A. van der Sluis. «Stability of the solutions of linear least squares problems». Numerische Mathematik, 23:241–254, 1975.
10. Bradski G., Kaehler A. «Learning OpenCV». O'Reilly, 2008.

Е.А. Девятериков, Б.Б. Михайлов

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ ВИЗУАЛЬНОГО ОДОМЕТРА ДЛЯ АВТОНОМНОГО ВОЗВРАЩЕНИЯ МОБИЛЬНОГО РОБОТА В СРЕДЕ БЕЗ ФИКСИРОВАННЫХ ТОЧЕК ОТСЧЕТА

Научно-учебный центр «Робототехника» МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва
retegor@mail.ru, robot@bmstu.ru

В работе представлена система автоматического возвращения мобильного робота к оператору с использованием данных визуального одометра, объединяемых с показаниями инерциального датчика. Приведены соотношения для оценки точности текущих измерений визуального одометра. Визуальная одометрия – метод определения координат с помощью технического зрения, основанный на измерении смещения ключевых точек пространства, информация о которых получается из анализа последовательности изображений. Такая система работает в заранее не подготовленной среде без стационарных точек отсчета, нечувствительна к проскальзыванию колес.

Введение

Для дистанционно управляемого мобильного робота при потере связи или недостаточной видимости требуется применять систему автономного возврата к оператору. Для этого необходима система определения местоположения и ориентации в пространстве. В условиях не детерминированной среды, когда нет точек отсчета, реперов, например стационарных маяков, традиционные средства автономной навигации: энкодеры, инерциальные датчики, GPS и дальномеры не всегда позволяют точно измерять текущие координаты робота для его возвращения к оператору. В экстремальных ситуациях альтернативой этим методам является автономная оценка собственного перемещения робота по изображениям бортовых телекамер – визуальная одометрия. Метод визуальной одометрии [1, 2, 3] основан на измерении смещения ключевых точек в пространстве, информация о которых получается из анализа последовательности стереоизображений системы технического зрения. Визуальный одометр – средство относительной навигации, не требующей наличия стационарных точек отсчета. В [4] приведены результаты проверки точности и быстродействия макета визуального одометра. В [5] и [6] результаты проверки системы управления мобильным роботом с визуальным одометров в обратной связи по положению. В [7] спроектирован алгоритм автоматического возвращения с учетом характеристик визуального одометра. В настоящей работе поставлены и решены следующие задачи:

1. разработать систему автоматического возвращения мобильного робота к оператору с совместным использованием данных визуального одометра и других относительных датчиков;
2. разработать алгоритм оценки точности показаний визуального одометра для комплексирования.

Система управления мобильного робота с возможностью автоматического возвращения к оператору по данным визуального одометра

Для решения задачи 1 была спроектирована система управления, показанная на рис. 1.

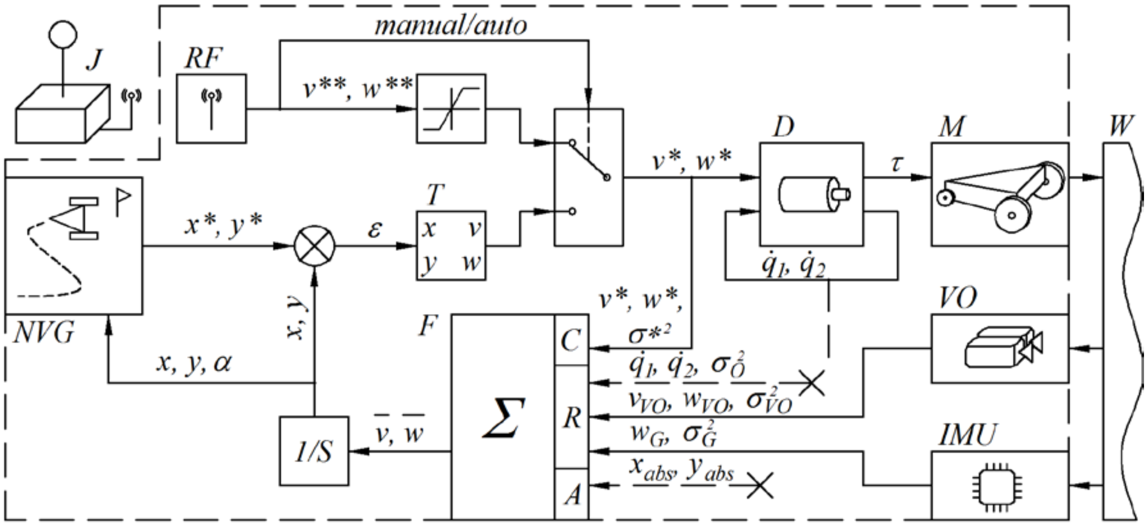


Рис. 1. Система управления мобильного робота с функцией автоматического возвращения

В обычном режиме *“manual”* оператор дистанционно управляет мобильным роботом с помощью джойстика *J*, задавая линейную скорость *v*** и угловую скорость *w***. Эти сигналы принимаются роботом через приемопередатчик *RF*, и поступают в систему управления приводами *D*. Блок *D* преобразует сигналы *v** и *w** в угловые скорости приводов. Система управления приводами имеет локальную обратную связь по угловой скорости колес $\dot{q}_1$ и $\dot{q}_2$, измеряемыми с помощью энкодеров. Создаваемый приводами момент τ приводит шасси робота *M* в движение. По стереоизображениям рабочей среды *W* визуальный одометр *VO* вычисляет линейную и угловую скорости робота v_{VO} и w_{VO}, а так же делает оценку дисперсии каждого измерения σ_{VO}^2. Инерциальная подсистема *IMU* так же дает на выходе значение угловой скорости робота w_G и оценку его дисперсии σ_G^2. Блок комплексирования датчиков *F*, учитывая текущие оценки их дисперсий, объединяет показания визуального одометра *VO* и инерциальной подсистемы *IMU*. Относительные датчики объединены в группу *R*. Учитываются так же сигналы управления *C*: *v** и *w** с заданной дисперсией σ^{*2} , характеризующей точность модели управления. В рамках решаемой задачи показания x_{abs} и y_{abs} абсолютных навигационных систем, например GPS, и колесной одометрии не используются. На выходе блок комплексирования *F* дает усредненные оценки линейной и угловой скорости $\bar{v}$ и $\bar{w}$, интегрирование которых позволяет оценить текущие координаты робота *x*, *y* и угол курса α. Блок автономной навигации *NVG* сохраняет пройденную роботом траекторию по алгоритму, описанному в [7], удаляя петли, заломы и шум.

При потере связи или подаче сигнала тревоги оператором блок *RF* переключат систему управления в режим *”auto”*, в котором робот автоматически возвращается по сохраненной траектории до восстановления ручного управления. В режиме *“auto”* блок автономной навигации *NVG* дает на выходе координаты *x** и *y** ранней точки сохраненной траектории, удаленной от робота на фиксированное расстояние, эта точка движется по траектории вместе с роботом. Блок тактического управления *T* преобразует разницу текущих и заданных координат в линейную и угловую скорость робота таким образом, чтобы он двигался по сохраненной траектории задним ходом.

Оценка точности показаний визуального одометра

Визуальная одометрия – статистическая задача с данными, содержащими нестационарный шум. Поэтому необходимо в режиме реального времени оценивать точность полученных результатов для их корректного объединения с показаниями других датчиков. Для этого были проанализированы факторы, наибольшим образом влияющие на точность визуального одометра:

5. Обусловленность решаемой системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ).
6. Погрешность определения положения особых точек на изображении.
7. Рассогласование времени захвата левого и правого изображения
8. Количество особых точек.

Для объединения визуального одометра с другими датчиками его дисперсия оценивается в виде:

$$\sigma_{VO}^2 = \sigma_{VO\_0}^2 k_\chi k_Z k_\omega k_n,$$

где $\sigma_{VO\_0}^2$ – экспериментально полученная базовая дисперсия, $k_\chi, k_Z, k_\omega, k_n$ – коэффициенты, учитывающие обусловленность, расстояние до особых точек, угловую скорость и количество точек.

Обусловленность. После нахождения изображений особых точек, которые можно устойчиво отличать от других точек и отслеживать с течением времени, задача визуальной одометрии сводится к оценке перемещения самого робота по видимому смещению этих точек. Для этого изменение положения системы координат робота описывается аффинным преобразованием. Координаты i-й точки пространства относительно робота C_i и P_i в текущий и предыдущий момент времени соответственно в случае навигации на плоскости связаны выражением [4]:

$$C_i = RP_i + T \quad <=> \quad \begin{pmatrix} X_i^C \\ Z_i^C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c & s \\ -s & c \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_i^P \\ Z_i^P \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} dX \\ dZ \end{pmatrix}$$

где c и s обозначены $\cos(\alpha)$ и $\sin(\alpha)$ курса робота α; необходимо найти матрицы поворота R и переноса T самого робота за время смены кадров. Если в силу кинематики робота требуется определять только пройденный путь dZ и угол курса α робота, то $dX = 0$ и для решения достаточно одной точки. Одна точка порождает 2 уравнения с 3-мя неизвестными, одну из которых можно исключить, сделав подстановку $s^2 = 1 - c^2$. Такая задача хорошо обусловлена, а МНК вырождается в нахождение среднего значения решений множества отдельных уравнений. Если дополнительно требуется различать боковое смещение dX, то для решения системы необходимо иметь минимум 2 точки. В этом случае необходимо с помощью МНК решить переопределенную СЛАУ $Ax = b$, где:

$$A = \begin{pmatrix} X_1^P & Z_1^P & 1 & 0 \\ Z_1^P & -X_1^P & 0 & 1 \\ X_2^P & Z_2^P & 1 & 0 \\ -X_2^P & Z_2^P & 0 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -X_N^P & Z_N^P & 0 & 1 \end{pmatrix}, \qquad x = (c, s, dX, dZ)^T, \qquad b = \left(X_1^C, Z_1^C, X_2^C, Z_2^C, \dots, X_n^C, Z_n^C\right). \qquad (1)$$

В этом случае на результат влияет взаимное положение точек в пространстве. Это необходимо учитывать при комплексировании и настройке фильтров, анализируя вычислительную устойчивость задачи. Увеличение ошибки вычислений в зависимости от взаимного положения точек данных будем описывать числом обусловленности $\chi(A)$ [8]. Из определения числа обусловленности следует зависимость погрешности решения СЛАУ δx от погрешности данных δA:

$$\frac{\|\delta x\|_2}{\|x_0\|_2} \le \chi(A) \frac{\|\delta A\|_2}{\|A\|_2} + O\left(\frac{\|\delta A\|^2}{\|A\|^2}\right).$$

Для переопределенной СЛАУ, решаемой МНК, тривиальным подходом является преобразовать ее в определенную: $(A^T A)x = A^T y$, решать ее и оценивать ее чувствительность так же как определенной. После некоторых преобразований число обусловленности для такой СЛАУ примет вид [8]:

$$\chi(A) \le \left(\frac{\|r_0\|_2}{\|x_0\|_2 \sigma_{min}} + 1\right) k_2 = \frac{\|r_0\|_2}{\|A\|_2 \|x_0\|_2} k_2^2 + k_2\,,$$

где $k_2 = \sigma_{max}/\sigma_{min}$ – отношение большего и меньшего сингулярных чисел матрицы A, $r_0 = b - Ax_0$ – остаток регрессии, x_0 - решение задачи МНК. Различные авторы, например [9], отмечают, что решение чувствительно к k_2^2, если r_0 велико в сравнении с Ax_0, а такая оценка ошибки решения близка к верхней границе и на практике часто завышена. В [8] проанализировано более 10-ти методов оценки верхней и нижней границы ошибки решения задачи МНК с возмущением. Показано, что методы не противоречат друг другу, представляя, в целом, более или менее жесткие оценки. В качестве современного консенсуса предложено вычислять нижнюю границу обусловленность задачи МНК как:

$$\chi(A) = \left(\frac{\|r_0\|_2^2}{\|x_0\|_2^2 \sigma_{min}^2} + 1\right)^{\frac{1}{2}} \frac{\|A\|_F}{\sigma_{min}},$$

где σ_{min} - наименьшее ненулевое сингулярное число матрицы A, $\|A\|_F$ - норма Фробениуса.

В оценку дисперсии введем коэффициент, учитывающий обусловленность:

$$\sigma_{VO}^2 \sim \frac{(\chi(A))^2}{k_{\chi 0}} = \left(\frac{\|r_0\|_2^2}{\|x_0\|_2^2 \sigma_{min}^2} + 1\right)\left(\frac{\|A\|_F}{\sigma_{min}}\right)^2 / k_{\chi 0} = k_\chi, \qquad k_{\chi 0} = const.$$

Расстояние до точек. Пространственные координаты особых точек $A(X, Y)$ относительно робота вычисляются из положения особых точек на изображениях x [10]. Дискретность изображения и погрешность Δx алгоритмов определения перепадов яркости (или других признаков) вносят ошибки определения пространственных координат точек $A'(X+\Delta X, Z+\Delta Z)$, что показано на рис. 2 а).

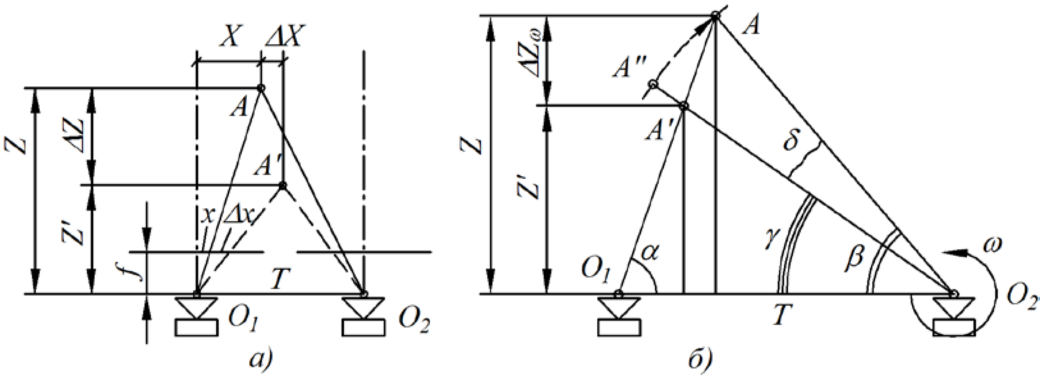


Рис. 2. Погрешность определения координат особых точек, а) – в зависимости от расстояния, б) – в зависимости от угловой скорости

Продифференцировав выражение в [10], получим зависимость погрешности определения координат от расстояния до точки и погрешности определения положения изображения точки:

$$\Delta X(\Delta x, Z) = \Delta x \cdot Z/f, \qquad \Delta Z(\Delta x, Z) = 2\Delta x \cdot Z^2/(fT),$$

где f – фокусное расстояние телекамер.

Норма матрицы возмущения $\|\delta A\|_2$ для задачи МНК (1) примет вид:

$$\|\delta A\|_2 = \sqrt{\sum 2\Delta X_i^2 + 2\Delta Z_i^2 + 2} = \sqrt{2(\Delta x/f)^2 \sum Z_i^2 \left(1 + Z_i^2/T^2\right)}$$

В оценку дисперсии визуального одометра был введен соответствующий коэффициент:

$$\sigma_{VO}^2 \sim \|\delta A\|_2^2 \sim \left(\sum_{i=1}^{n} Z_i^2 \left(1 + \frac{Z_i^2}{T^2}\right)\right)/k_{Z0} = k_Z,$$

где k_{Z0} - экспериментально подобранная константа.

Рассогласование телекамер по времени. Геометрические расчеты (рис. 2б) в [4] показали, что рассогласование времени захвата изображений левой и правой телекамеры при повороте вносит существенные ошибки в измерение расстояния до точек, которые необходимо учитывать. Для упрощения расчетов были введены два ограничения. а) Расстояние до особых точек Z по крайней мере в 3 раза больше стерео базы T: $Z \geq 3T$. В этом случае поворот телекамеры вокруг любой точки в пределах базы, например т. C, может приближенно рассматриваться как поворот вокруг одной из телекамер. б) Горизонтальный угол обзора телекамеры не превышает $90°$: $-\pi/4 \leq \alpha, \beta, \gamma \leq \pi/4$. Это позволило разложить тангенс в ряд Тейлора до первого слагаемого с точностью 23%.

Решив треугольники $O_1 O_2 A$ и $O_1 O_2 A'$, найдем реальное и ошибочное расстояние до точки A:

$$\Delta Z_\omega = Z - T\frac{\tan\alpha \tan\gamma}{\tan\alpha + \tan\gamma}, \qquad Z = T\frac{\tan\alpha \tan\beta}{\tan\alpha + \tan\beta}, \qquad \gamma = \beta - \delta = \beta - \omega\Delta t$$

Разложив тангенс в ряд Тейлора, подставив выражение для γ, после преобразований получим зависимость относительной погрешности определения расстояния до точки от угловой скорости:

$$\frac{\Delta Z_\omega}{Z} = \frac{\alpha}{\beta} \times \frac{\omega\Delta t}{\alpha + \beta - \omega\Delta t} \approx \frac{\alpha}{\beta} \times \frac{\Delta t}{\alpha + \beta} \times \omega \;\; => \;\; \frac{\Delta Z_\omega}{Z} \sim \omega.$$

Из ограничения $Z \geq 3T$ следует, что $\alpha + \beta \gg \delta$, т. е. $\alpha + \beta \gg \omega\Delta t$, поэтому в рамках задачи слагаемым $\omega\Delta t$ можно пренебречь. Погрешность $\Delta X_\omega \ll \Delta Z_\omega$, поэтому не будем учитывать ΔX_ω в матрице возмущения. Коэффициент, учитывающий угловую скорость робота примет вид:

$$\sigma_{VO}^2 \sim (\Delta Z_\omega/Z)^2 \sim \omega^2/\omega_0^2 = k_\omega$$

Количество особых точек. Количество измерений в эксперименте, а в случае визуальной одометрии количество особых точек, влияет на дисперсию их среднего значения в соответствии с правилами сложения случайных величин. Обычно, измерения в эксперименте принимаются за независимые переменные, например $p_1, \dots, p_n$ с равной дисперсией $\sigma_{VO}^2(p)$. Тогда, дисперсия среднего:

$$\sigma_{VO}^2(\overline{p}) = \sigma_{VO}^2\left(\frac{p_1}{n} + \dots + \frac{p_n}{n}\right) = \frac{1}{n^2}\left(\sigma_{VO}^2(p_1) + \dots + \sigma_{VO}^2(p_n)\right) = \frac{1}{n^2} n\sigma_{VO}^2(p) = \frac{\sigma_{VO}^2(p)}{n}.$$

Для простоты примем это же отношение и для метода наименьших квадратов (МНК) и в оценку дисперсии введем коэффициент, учитывающий количество особых точек: $\sigma_{VO}^2 \sim n_0/n = k_n, n_0 = const.$

Проверка системы автоматического возвращения

Предложенная система управления для автоматического возвращения мобильного робота к оператору по данным визуальной одометрии, алгоритм оценки точности показаний визуального одометра и алгоритм объединения данных визуального одометра и инерциального датчика были реализованы и для проверки установлены на тот же мобильный трехколесный робот, который использовался в предыдущих экспериментах [4]. Для снижения накопленной ошибки угла курса измерения визуального одометра α_{VO} были объединены с показаниями гироскопа α_G по формуле:

$$\overline{\Delta\alpha} = \left(\frac{\sigma_G^2}{\sigma_{VO}^2 + \sigma_G^2}\right)\Delta\alpha_{VO} + \left(\frac{\sigma_{VO}^2}{\sigma_{VO}^2 + \sigma_G^2}\right)\Delta\alpha_G$$

В качестве инерциального датчика был использован InvenSense MPU6050 с MEMS гироскопом. Для визуальной одометрии использовалась стереокамера российского производства фирмы «ООО Сибо Тек» с матрицами OmniVision OV7725, 640x480 пикс., 30 кадров/с, синхронизация до 1 мс, база 120 мм. Телекамера установлена на высоте 500 мм под наклоном 10° к горизонту, гироскоп жестко закреплен на телекамере. Эксперимент проводился в помещении на ровной поверхности в 2 этапа. На первом этапе робот в режиме «*manual*» двигался из точки *Start* (Рис. 3) в точку *R* под управлением оператора, который джойстиком вел робот по условному маршруту, проходящему через точки C_1 и C_2, отмеченные на полу; длина маршрута $S \approx 10$ м, маршрут содержит повороты на $30°, 60°$ и $90°$.

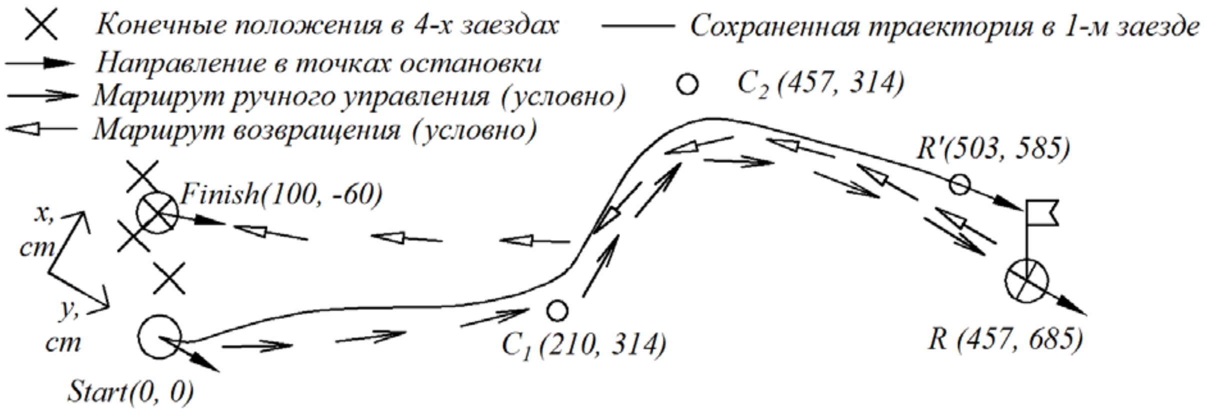


Рис. 3. Результаты заезда мобильного робота с автоматическим возвращением

При этом система управления по данным визуального одометра и инерциального датчика сохраняла траекторию по алгоритму из [7]. Полученная траектория показана сплошной линией, а вычисленное конечное положение робота точкой R'. Сохранялись так же накопленные ошибки угла курса визуального одометра $\Delta\alpha_{R'VO}$, гироскопа $\Delta\alpha_{R'G}$ и объединенный результат с учетом оценок погрешностей $\alpha_{R'}$. На втором этапе робот по сохраненным данным автономно возвращался из точки R в исходную точку маршрута задним ходом и реально прибывал в т. *Finish*. Всего робот совершил 4 заезда, результаты которых показаны в таблице.

Таблица 1. Результаты эксперимента.

Заезд	*R', см*	$\Delta\alpha_{R'}$,°	$\Delta\alpha_{R'VO}$,°	$\Delta\alpha_{R'G}$,°	*Finish, см*	$\lvert Finish\rvert/S,\%$
1	(503, 585)	1	-5	6	(100, -60)	12
2	(445, 605)	3	4	4	(70, -69)	10
3	(500, 620)	3	-6	4	(32, -50)	6
4	(575, 580)	7	12	6	(110, -100)	15

Из результатов видно, что спроектированная система управления с визуальным одометром [4, 5] с использованием алгоритма сохранения траектории [7] и объединением показаний с инерциальным датчиком по предложенному алгоритму позволяет осуществлять автоматическое возвращение мобильного робота к оператору со средней точностью $\approx 11\%$ от длины пути возвращения. Из таблицы видно так же, что в среднем погрешность объединенных показаний визуального одометра и инерциального датчика ниже, чем погрешность этих датчиков по отдельности. Это подтверждает работоспособность предложенного алгоритма оценки точности показаний визуального одометра и алгоритма объединения показаний датчиков.

Заключение

В ходе работы была спроектирована и реализована система автоматического возвращения мобильного робота к оператору по алгоритму, описанному в [7], с совместным использованием данных визуального одометра и других относительных датчиков. Результаты эксперимента подтвердили, что система позволяет при потере связи автоматически вернуть робот в исходную точку со средней точностью 11%. Был разработан алгоритм оценки точности показаний визуального одометра для комплексирования его с другими датчиками. Эксперимент показал, что применение этого алгоритма позволяет с помощью гироскопа и визуального одометра получать более точные значения угла курса робота, чем с помощью этих датчиков отдельно. Таким образом, визуальный одометр позволяет улучшить точность системы автоматического возвращение мобильного робота в недетерминированной среде без стационарных точек отсчета.

1. Jin Xu, Minyi Shen, Weiqiang Wang, Li Yang, Jilin Liu, Igor Kalyaev, «Robust stereo visual odometry for autonomous rover», 6th WSEAS International Conference on Signal, Speech and Image Processing. 2006;
2. David Nist´er, Oleg Naroditsky, James Bergen, «Visual odometry for ground vehicle appli-cations». Journal of Field Robotics, Volume 23(1). 2006. Pp. 3-20.
3. Davide Scaramuzza and Friedrich Fraundorfer, Visual Odometry [Tutorial], Robotics & Au-tomation Magazine, Volume:18, Issue: 4. 2011. Pp. 80 – 92.
4. Девятериков Е. А., Михайлов Б. Б. «Визуальный одометр». Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2012. Спец. вып. №6. С. 68-82.;
5. Девятериков Е. А., Михайлов Б. Б. «Система управления движением мобильного робота с визуальным одометром». Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Сер. «Информатика. Телекоммуникации. Управление». 2013. Вып. №5(181). С. 103-108.
6. Девятериков Е. А., Михайлов Б. Б. «Использование данных визуального одометра в системе управления мобильного робота». Экстремальная робототехника 2012;
7. Девятериков Е. А., Михайлов Б. Б. «Алгоритм автоматического возвращения мобильного робота по данным визуального одометра». Экстремальная робототехника 2014;
8. Joseph F. Grcar, «Optimal Sensitivity Analysis of Linear Least Squares», Lawrence Berkeley National Laboratory report LBNL-52434, 2002.
9. A. van der Sluis. «Stability of the solutions of linear least squares problems». Numerische Mathematik, 23:241–254, 1975.
10. Bradski G., Kaehler A. «Learning OpenCV». O’Reilly, 2008.

K. Senin

X-RAY TOMOGRAPH «SHTOK-TM» AND RESULTS OF ITS TRIAL OPERATION

«Military Unit 35533», Moscow, Russia

К.М. Сенин

РЕНТГЕНОВСКИЙ ТОМОГРАФ «ШТОК-ТМ» И РЕЗУЛЬТАТЫ ЕГО ОПЫТНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Федеральное казенное учреждение «Войсковая часть 35533», г. Москва

Первоочередной задачей при обеспечении безопасности населения на объектах транспортной инфраструктуры является своевременное обнаружения взрывных устройств, их элементов, оружия и других закрещенных к провозу предметов и веществ в личных вещах и багаже авиапассажиров.

Диагностика провозимых физическими лицами багажа и ручной клади проводится с целью получения максимально полной информации о провозимых предметах.

Существует множество способов неразрушающего (бесконтактного) анализа багажа, как визуальные к примеру рентгеновские так и не визуальные, такие как нейтронно-активационный анализ.

В настоящее время для получения визуальных теневых рентгеновских изображений успешно применяются рентгеновские интроскопы. В обеспечении безопасности широко применяются интроскопы, как зарубежного производства, так и отечественного.

В основе принципа работы рентгеновских интроскопов лежит генерируемый однородный поток рентгеновского излучения который попадает на контролируемый объект, а затем на флюороскопический экран который чувствителен к рентгеновскому излучению. Проходя через контролируемый объект поток излучения ослабляется пропорционально величине средней плотности материала контролируемого объекта вдоль направления распространения излучения. На выходе из контролируемого объекта создается поток излучения, интенсивность которого в различных точках его сечения пропорциональна средней плотности вдоль распространения излучения. Создается так называемое теневое изображение. Под действием неоднородного потока флюороскопический экран светится неравномерно. Яркость его свечения пропорциональна интенсивности излучения. Возникает светотеневое изображение, которое воспринимается телевизионной камерой. Телевизионный сигнал передается на расстояние и воспроизводится на мониторе пульта управления.

Однако данный тип рентгеновской аппаратуры имеет ряд недостатков, одно из главных ограниченное количество ракурсов, в котором оператор может получать рентгеновские изображения багажа пассажиров для анализа.

Данную проблему помогают решить рентгеновские томографы соединяющие в себе достоинства вычислительной томографии и двухэнергетической трансмиссионной радиометрии. В результате появляется возможность определить эффективный атомный номер вещества Z_{eff} , и его плотность ρ, а также получить пространственное изображение внутренней структуры объекта контроля. Рентгеновские томографы применяются для досмотра багажа и личных вещей авиапассажиров с конца 90-х годов, они обладают рядом преимуществ по выявлению запрещенных к провозу предметов, так, как с помощью компьютерной реконструкции 3D изображения и применения технологий 2-х энергетической трансмиссионной радиографии предоставляют оператору информацию о взаимном расположении объектов внутри багажа и выделение потенциально опасных веществ. Томографы на порядок дороже существующих досмотровых рентгеновских систем, что ограничивает их широкое применение. Как отмечалось выше, томографы в большей степени интегрируются в досмотровую систему предполетного досмотра багажа аэропортов.

Рис. 1. Томограф «Шток-ТМ»

В ходе реализации приложения № 8 Комплексной программы обеспечения безопасности населения на транспорте (2010 - 2013 гг.) в рамках ОКР «Шток-ТМ» ЦНИИ РТК в интересах ФГКУ «В/ч 68240» был разработан первый российский рентгеновский томограф «Шток-ТМ».

Томограф обеспечивает:

- получение 3-х мерных томографических изображений объекта контроля с реализованной Z – функцией. (рис. 2,3)

- размеры туннеля для багажа (ШхВ) составляют 750х650 мм

- производительность контроля:
  - в стандартном режиме до 500 ед. багажа/ч;
  - в режиме углубленного досмотра 100 ед. багажа/ч.
- режим работы – непрерывный;
- возможность интеграции в систему контроля багажа транспортного предприятия;
- автоматическое обнаружение потенциально-опасных веществ по томографическому изображению.
- возможность настройки на обнаружение заданной группы веществ.

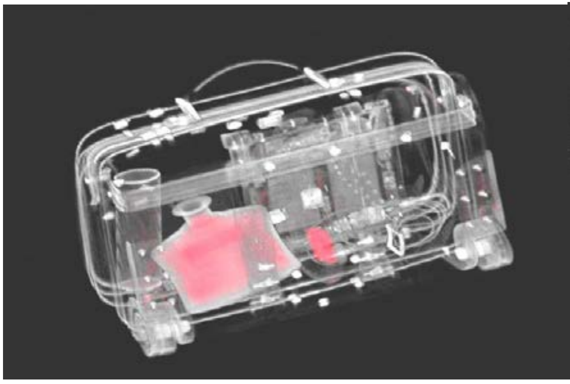


Рис. 2. Дорожный саквояж с имитаторами взрывчатых веществ которые выделены красным цветом

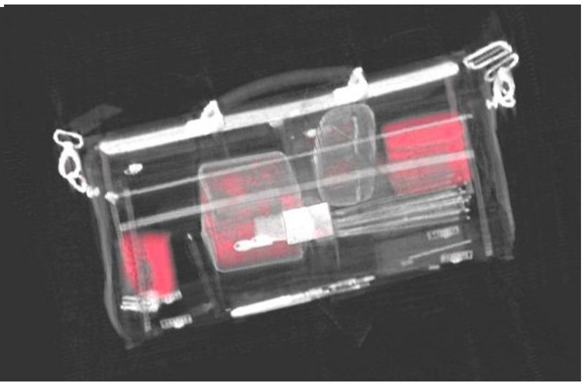


Рис. 3. Чемодан с иммитаторами взрывчатых веществ, которые выделены красным цветом

Летом 2015 г. запланирована опытная эксплуатация одного опытного образца рентгеновского томографа "Шток-ТМ" в аэропорту "Пулково". В рамках опытной эксплуатации планируется обследовать около 500 единиц ручной клади и багажа авиапассажиров на предмет нахождения в них взрывчатых веществ, и иных запрещенных к провозу предметов.

A. Vazaev, V. Noskov, I. Rubtcov

INCREASING OF ACCURACY FOR ENVIRONMENT MODEL WITH USE DATA FROM INTEGRATED VISION SYSTEM

Bauman MSTU, Moscow, Russia
vazaev@bmstu.ru, noskov_mstu@mail.ru

А.В. Вазаев, В.П. Носков, И.В. Рубцов

ПОВЫШЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ МОДЕЛИ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ ПО ДАННЫМ КОМПЛЕКСИРОВАННОЙ СТЗ

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва
vazaev@bmstu.ru, noskov_mstu@mail.ru

В настоящее время практически всеиспользуемые мобильные робототехнические комплексы (МРК)военного, специального и гражданского назначенияоснащены системами дистанционного управления.Такие системы, особенно в случаях военного и специального применения, имеют ряд недостатков и ограничений, а именно: повышенные требования к каналу связи по надёжности, ограниченный радиус действия, возможность применения средств радиоэлектронного противодействия, демаскировка пункта и объекта управления.Поэтому дальнейшее развитие военной и специальной мобильной робототехникисвязано с повышением автономности МРК за счет передачи функций, выполняемых человеком-оператором, бортовым средствам.Для автономных систем управленияодной из центральныхпроблемявляется проблема построения такой модели внешней среды, на которой возможно проигрывать и оптимизировать различные варианты будущего поведения и движения МРК и эффективно решать навигационные задачи [1,2].

Для искусственных сред (помещения, здания и подавляющее большинство промышленно-городских сред)и твердых грунтовпостроениемодели может быть выполнено только по геометрическим данным, получаемым от сканирующего лазерного дальномера [3,4]. Однако естественная среда кроме геометрических имеет и другие характеристики и факторы, влияющие на движение МРК [5]. Одним из таких факторов является наличие преодолимых препятствий (высокая трава, кустарник, разрушаемые объекты) и наоборот – наличие непреодолимых ровных участков (слабонесущий грунт, тонкий лед, рыхлый и глубокий снег, болото, водные преграды). Таким образом, при формировании модели естественной среды на основе исключительно геометрических оценок[4] ее использование в системе автономного управления может значительно снизить эффективность работы МРК и его безопасность при движении. Поэтому перспективным являетсякомплексирование различных сенсоров (видеокамер, сканирующих лазерных дальномеров, радиолокаторов, тепловизоров, спектроанализаторов, …), поставляющих не только геометрические характеристики, но и другие физические характеристики и свойства опорной поверхности. Комплексирование сенсоров различной физической природы позволит формировать более полные модели внешней среды и в перспективе решить актуальную задачу дистанционного определения опорной проходимости.

Для получения экспериментальных данных и проверки разработанных алгоритмов и программ совместной обработки данных от сенсоров различной физической природысоздан макет комплексированной СТЗ (рис. 1) закрепленный на подвижном объекте.

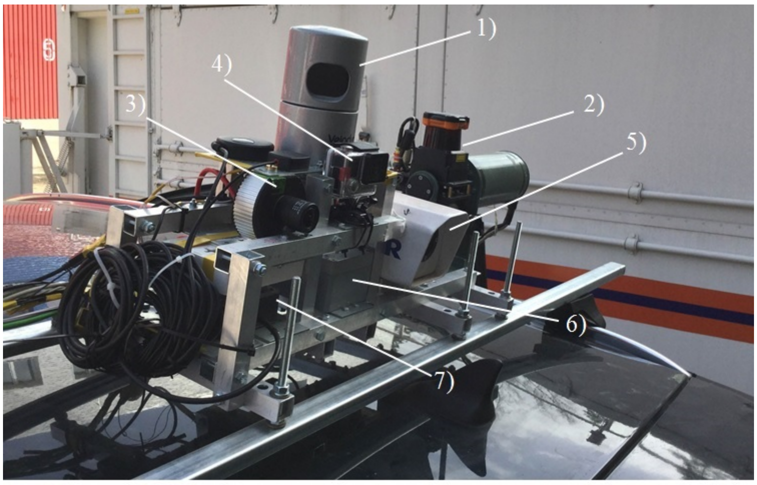


Рис. 1. Макет комплексированной СТЗ

В состав макета входят:

1) сканирующий3D-лазерный дальномера HDL-32E;
2) сканирующий 2D-лазерный дальномер HokuyoUTM-30LX-HOKUYO на опорно-поворотном устройстве;
3) телевизионнаякамера ArecontVisionAV2115DN;
4)телевизионнаякамераGoProHero;
5) тепловизионная камера FLIRSR-19;
6)интегрированная инерциально-спутниковая навигационная система Компанав-2МТ;
7) устройства сопряжения с ЭВМ.

Для возможности комплексного использованияданныхотвышеперечисленных сенсороввыполнена их взаимная юстировка, заключающая в определении относительных линейных и угловых смещений координат сенсоров, а так жегеометрических искажений объективов видеокамер и тепловизора[6]. Данные юстировки позволяют совмещатьдальнометрические, видео- и тепловизионные изображения, в результате чего получается геометрия рельефа в виде облака точек $\mathbf{T}$, с распределением на нем цветового и температурного полей:

$$\mathbf{T} = [T_i] = [< \alpha_i, \beta_i, d_i, I_i, R_i, G_i, B_i, Y_i >],$$

гдеi= 1,2, … n;

α_i, β_i – углы, соответственно, горизонтальной и вертикальной развёртки 3D-лазерного сенсора;

d_i – измеренная дальность;

I_i – измеренная интенсивность отражённого зондирующего сигнала;

R_i, G_i, B_i – три компоненты цвета пиксела, полученные с телевизионной камеры;

Y_i – температура пиксела, полученная с тепловизионной камеры.

Рассмотрим для примера результат работы созданного программно-алгоритмического обеспечения, решающего задачи сегментации комплексированного изображения с целью распознавания на опорной поверхности растительности. На Рис. 2 показаны исходныедальнометрическое (1), цветное телевизионное (2) и тепловизионное (3) изображения одного и того же участка опорной поверхности, полученные комплексированной СТЗ и приведенные в одну и туже проекционную систему координат.

На Рис. 3 приведена горизонтальнаяпроекция зоны обзора (вид сверху), на котором по данным видеокамеры выделена зеленая область (а), по данным тепеловизора выделены области равных интервалов температур (б), а по данным 3D-лазерного сканирующего дальномера(HokuyoUTM-30LX-HOKUYO на опорно-поворотном устройстве) выделены области с равными интервалами СКО высот рельефа опорной поверхности.

Из Рис. 3 а), б) и в) видно, чтоучастки с растительностью практически полностью совпадают во всем существующем для данногокомплексированного СТЗ пространстве признаков. Аналогичные результаты получены и для других типов опорной поверхности (глина, песок, гравий, бетон, асфальт, снег, лед, водные поверхности) для различных погодных условий и времени суток.

Проведенные натурные экспериментальные исследования позволяют сделать заключение, что использование комплексированных“дально-видео-тепловизионных” изображений позволяет существеннорасширить спектр решаемых по данным СТЗ задач распознавания-навигации и повысить эффективность (достоверность, быстродействие, точность) их решения.

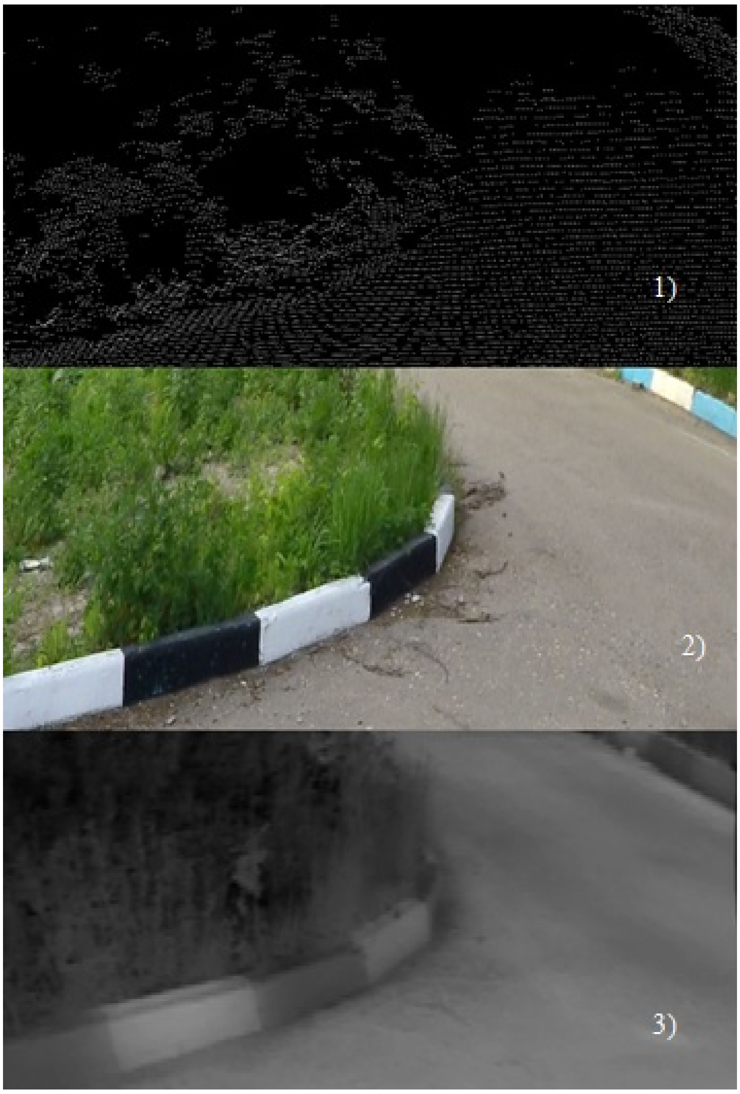


Рис. 2. Исходные изображения комплексированной СТЗ

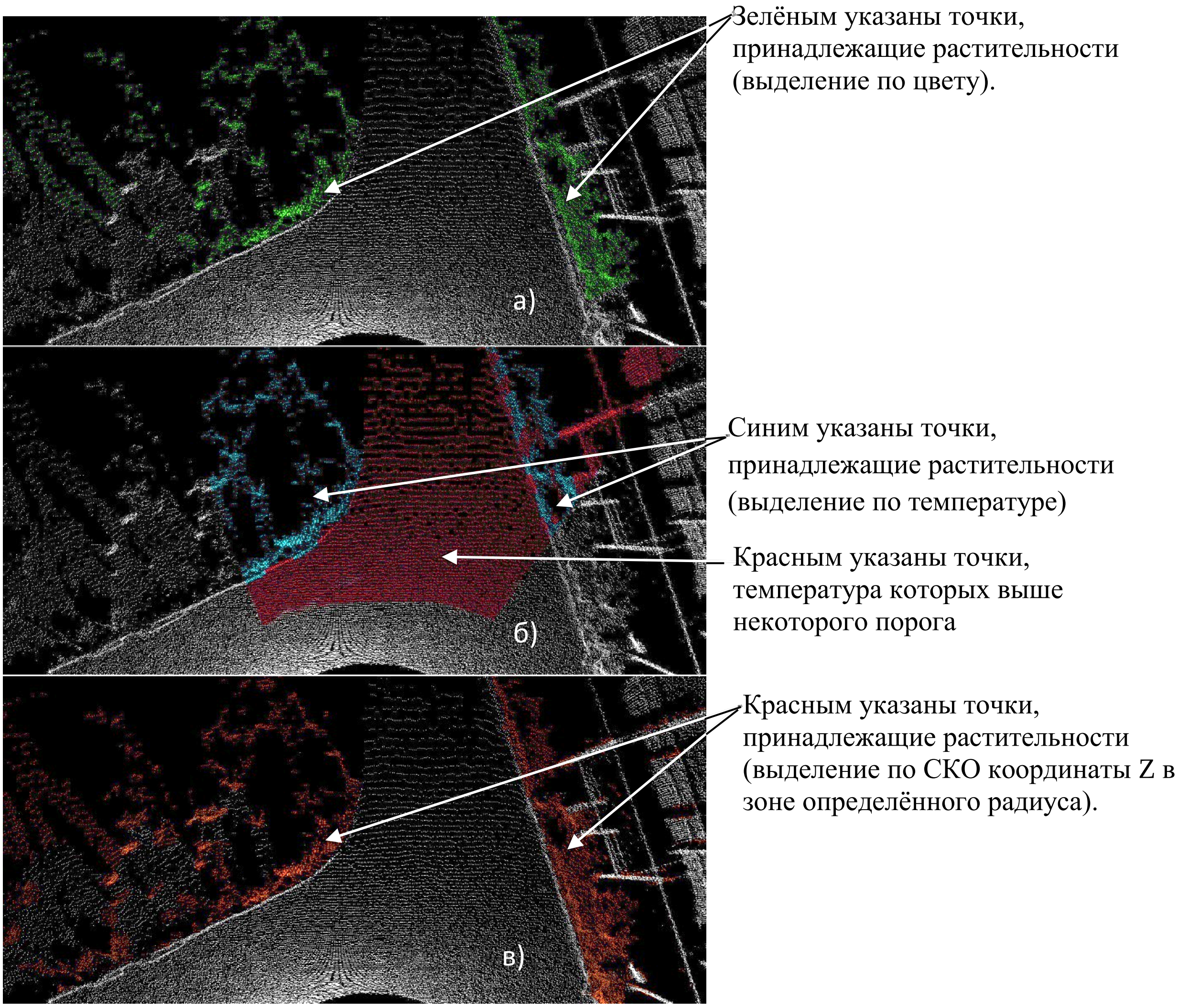


Рис. 3. Сегментация по цвету, температуреи СКО координаты Z (вид сверху)

1. Каляев А.В., Чернухин Ю.В., Носков В.П., Каляев И.А. Однородные управляющие структуры адаптивных роботов. – М: Наука, 1990, -152с.
2. Носков В.П., Рубцов И.В. Опыт решения задачи автономного управления движением мобильных роботов. // М.: «Новые технологии», ж. «Мехатроника, автоматизация, управление» №12, 2005. с. 21-24.
3. Лакота Н.А., Носков В.П., Рубцов И.В., Лундгрен Я.-О. Моор Ф. Опыт использования элементов искусственного интеллекта в системе управления цехового транспортного робота. М.: Машиностроение, ж.Мехатроника, №4, 2000. с. 44-47.
4. Буйволов Г.А., Носков В.П., Руренко А.А., Распопин А.Н. Аппаратно-алгоритмические средства формирования модели проблемной среды в условиях пересеченной местности. //Сб. научн. тр. Управление движением и техническое зрение автономных транспортных роботов. – М: ИФТП. 1989. – С. 61-69.
5. Машков К. Ю., Рубцов В. И., Штифанов Н. В.Автоматическая система обеспечения опорной проходимости мобильного робота / // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Машиностроение. - 2012. - Вып. Специальная робототехника. - С. 95-106.
6. Носков А. В., Рубцов И. В., Романов А. Ю. Формирование объединенной модели внешней среды на основе информации видеокамеры и дальномера. / Ж. Мехатроника, автоматизация, управление. // М.: Из-во «Новые технологии», 2007. №8, С. 2-5.

A. Khanin

ROAD SCENES DETECTION RELIABILITY INCREASING BASED ON COMBINING OF TELEVISION, THERMAL VISION AND RANGE DATA

Bauman MSTU, Moscow, Russia
alexandr.khanin@gmail.com

А.А. Ханин

ПОВЫШЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ РАСПОЗНАВАНИЯ ДОРОЖНЫХ СЦЕН ЗА СЧЕТ КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ ТЕЛЕВИЗИОННЫХ, ТЕПЛОВИЗИОННЫХ И ДАЛЬНОМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ

МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва
alexandr.khanin@gmail.com

Системы технического зрения (СТЗ) мобильных робототехнических комплексов для решения навигационной задачи и распознавания дорожных сцен в условиях скоростных магистралей и городских дорог уже стали реальностью. Большинство автоконцернов и производителей транспортных средств достаточно давно ведут исследования в данном направлении и добились серьезных успехов. Так автономные автомобили Google уже легализованы в трех штатах США и проехали в совокупности более полумиллиона километров всего с двумя ДТП, причем, оба по причине человеческого фактора. Адаптивный круиз-контроль и автопилоты, берущие на себя управление на скоростях до 60 км/ч, а также способные парковаться без участия водителя, сейчас являются уделом премиальных брендов. До конца десятилетия эти функции станут обязательной опцией даже массовых автомобилей. Однако, городские условия с наличием дорожной разметки и гладким дорожным полотном являются лишь частным случаем задачи автономной навигации мобильных робототехнических комплексов. В общем случае, согласно классификации дорог общего пользования по СНиП 2.05.02-85, дороги V категории могут вообще не иметь твердого покрытия, разметки и обочины. Задача автономной навигации по подобным грунтовым и гравийным дорогам, а также по дорогам необщего пользования по-прежнему решена лишь частично. С учетом того, что в России нормативным требованиям соответствуют лишь 38% автомобильных дорог федерального значения, указанная задача является чрезвычайно актуальной.

В данной работе рассматривается СТЗ, в основе которой лежат алгоритмы комплексирования и анализа данных трех сенсоров разной природы – телевизионной камеры, 2D лазерного сканирующего дальномера и тепловизионной камеры. Существующие СТЗ, например, из работы [1], а также из предыдущей работы авторов [2] имели ряд ограничений по эксплуатации ввиду использования телевизионной камеры. Основными недостатками телевизионного канала в решении навигационной задачи можно назвать сложность или часто невозможность регистрации объектов сцены алгоритмами в плохих условиях. Под плохими условиями подразумевается недостаточное (в темное время суток, наличие теней) или непостоянное (движение на большой скорости) освещение, неблагоприятные погодные условия (дождь, снег, туман), наличие препятствий или объектов, влекущих ошибки 1-го или 2-го рода.

Для расширения диапазона рабочих условий и достоверности распознавания дорожных сцен наибольший интерес представляет инфракрасный диапазон, длины волн которого лежат в диапазоне от 700 нм до 1 мм. Длина волны зависит от температуры, поэтому применение тепловизионных камер может быть полезно в качестве дополнительного источника информации в системе, поэтому СТЗ из работы [2] была дополнена тепловизионной камерой FLIR FC серии T. Матрица используемой модели позволяет видеть распределение температур на измеряемой поверхности в разрешении QVGA 320×240 пикселей с частотой обновления изображения 9 Гц, детектор неохлаждаемый ванадий-оксидный микроболометр с длительным сроком работы, объектив безфокусный атермический 6 мм, шаг измерения температуры – 0,1°С.

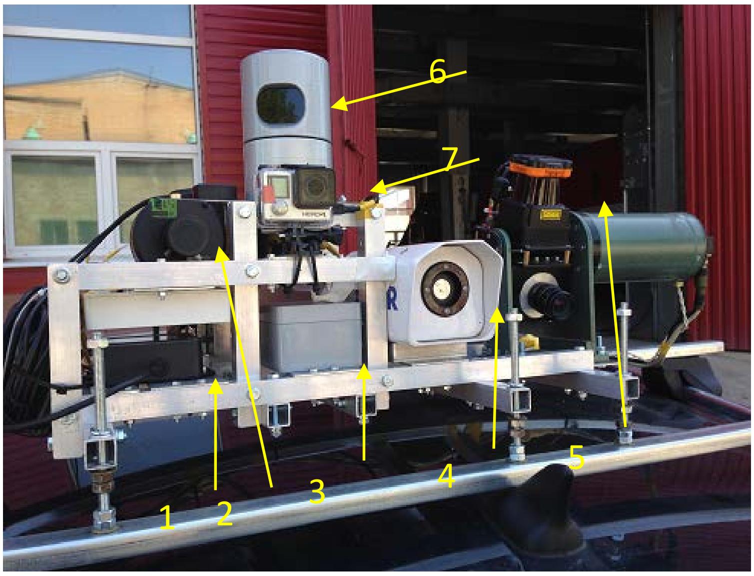
При создании макета СТЗ на каркасе из алюминиевого профиля были размещены следующие устройства и сенсоры (Рис. 1б):

1) устройство сопряжения с ЭВМ;
2) телевизионная камера Arecont Vision AV2115DN с объективом Computar A4Z1214CS-MPIR;
3) интегрированная инерциально-спутниковая навигационная система «Компанав-2МТ»;
4) тепловизионная камера FLIR SR-19;

5) лазерный сканирующий 2D-дальномер Hokuyo UTM-30LX-HOKUYO на опорно-поворотном устройстве;
6) лазерный сканирующий 3D-дальномер VELODYNE HDL-32E;
7) action-камера GoPro Hero 4.

Для регистрации данных сенсоров в максимально приближенных к реальным условиям СТЗ была смонтирована на интегрированные рейлинги автомобиля (Рис. 1а).

а



б

Рис. 1. Макет комплексированной системы технического зрения
а) смонтированной на автомобиль и б) крупным планом

Все упомянутые сенсоры были подвергнуты взаимной калибровке – определении относительных линейных и угловых смещений координат сенсоров, а так же геометрических искажений матриц и объективов телевизионных камер и тепловизора [4]. Такая операция позволяет совмещать дальнометрические, телевизионные и тепловизионные изображения, в результате чего получается геометрия рельефа в виде облака точек T, с распределением на нем цветового и температурного полей:

$$T = [T_i] = [< \alpha_i, \beta_i, d_i, I_i, R_i, G_i, B_i, Y_i >], \text{ где}$$

i = 1,2, …, n;

α_i, β_i,– соответствующие углы горизонтальной и вертикальной развёртки лазерного 3D-сканера;

d_i – измеренная дальность;

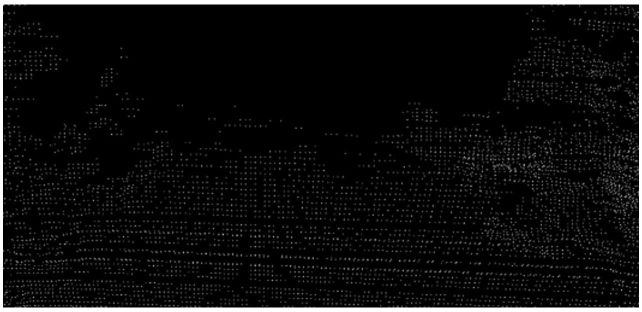
I_i – измеренная интенсивность отражённого зондирующего сигнала;

R_i, G_i, B_i – три компоненты интенсивности пиксела, полученные с телевизионной камеры;

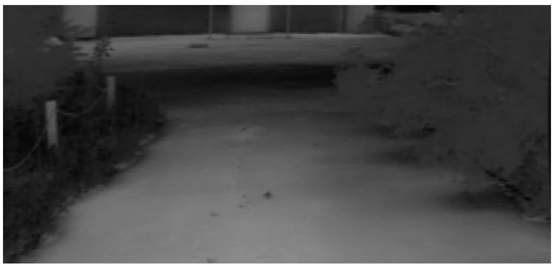
Y_i – температура точки поверхности, измеренная тепловизионной камерой.

Отдельно остановимся на калибровке тепловизора. Ввиду того, что результатом работы тепловизора является распределение температуры измеряемой поверхности, классический подход с калибровкой «шахматной доской» не пригоден. Для вычисления матрицы дисторсии из токопроводящего материала была изготовлена эталонная тепловая сетка с размером 80×80 см и квадратной ячейкой 10 см. Сетка была закреплена на листе фанеры. При протекании тока по сетке ее температура превышала температуру окружающей среды, узлы и ребра сетки становились отчетливо видимыми в тепловом диапазоне. Далее производились расчет модели искажений и их компенсация в полной аналогии с работой со значениями интенсивности яркости пикселей телевизионной камеры. Ввиду того, что используемая телевизионная камера обладает большей разрешающей способностью и уже ранее была взаимно откалибрована с лазерным сканирующим дальномером, то калибровка тепловизора выполняется относительно именно нее. Приведение данных в общую область значений (нормализация) для последующего анализа затруднялась из-за временной рассинхронизации потоков и пространственной привязка сцен из-за использования отдельных камер для каждого потока. Для решения данной проблемы были применены специальные методы привязки изображений разных спектров на основе селекции характерных точек и критерия максимума взаимной информации. Узлы сетки и доски были обнаружены с помощью детектора углов Харриса [3] и совмещены в соответствующих телевизионных и тепловизионных изображениях. Ввиду того, что оптические оси телекамеры и тепловизора параллельны, но не совмещены, изображения центрировались по вертикали со сдвигом по горизонтали. Наличие горизонтального сдвига было компенсировано обрезкой телевизионного изображения – его формат 16:9 был приведен к формату тепловизионного изображения 4:3 и центрирован по обеим координатам. Примеры исходных изображений реальной дорожной сцены, полученных с откалиброванных лазерного сканирующего дальномера, телевизионной и тепловизионной камер приведены на Рис. 2.

а



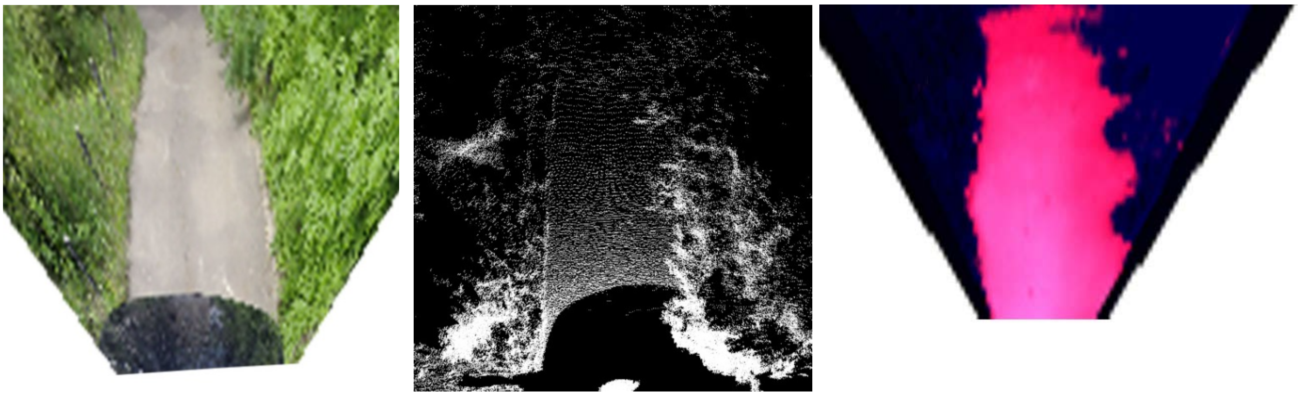
б



в

Рис. 2. Примеры исходных изображений одной и той же дорожной сцены, полученных с а) телевизионной камеры, б) лазерного сканирующего дальномера и в) тепловизора

Первым этапом обработки данных обоих сенсоров является преобразование изображений из трехмерной системы координат камеры (Рис. 2) в двухмерную систему координат дороги (Рис. 3), то есть переход от полученных изображений сцены с перспективными искажениями к изображениям в плоскости горизонта. Данная операция не искажает геометрию дороги, позволяет выделить параллельность краев дорожного полотна и исключить зону выше горизонта, тем самым сократив область обработки и повысив быстродействие.



а б в

Рис. 3. Примеры исходных изображений одной и той же дорожной сцены, полученных с а) телевизионной камеры, б) лазерного сканирующего дальномера и в) тепловизора

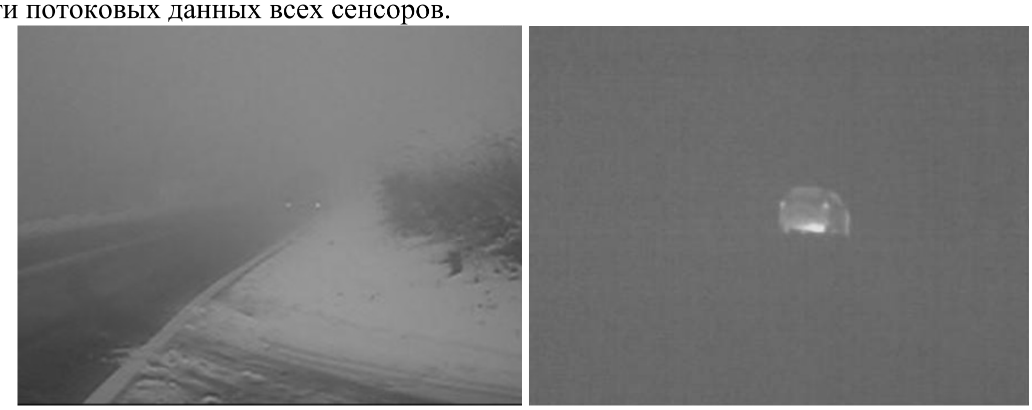
Из Рис. 4 отчетливо видно, что участки дорожного полотна однозначно выделяются и полностью совпадают во всем существующем для данного комплексированного СТЗ пространстве признаков. Аналогичные результаты получены и для других видов дорог (бетонная, грунтовая, песчаная, гравийная) в различных погодных условиях и времени суток.

Рис. 4. Результаты комплексирования изображений одной и той же дорожной сцены

Таким образом, предложенные в работе [2] алгоритмы оценки параметров движения, основанные на анализе последовательности телевизионных и светолокационных изображений, были уточнены тепловизионной информацией. В развитие данного вопроса были проведены экспериментальные исследования по оценке эффективности работы предлагаемого алгоритмического обеспечения в различных дорожных и погодных условиях. В целом, проведенные испытания показали работоспособность применяемого алгоритмического обеспечения для решения задач расширения диапазона рабочих условий и повышения достоверности автономной навигации мобильного робототехнического комплекса в условиях грунтовых дорог и пересеченной местности.

В ряде случаев за исключением снегопадов и наличия выпавшего снега дорожное полотно по температуре отличается на 0,5-3°С от обочин, что позволяет более точно распознавать границы дорожного полотна, минимизируя ошибки 2-го рода. Контраст температур дороги и прилегающей территории можно объяснить испарением влаги с растительности.

Недостаток тепловизионных камер состоит в том, что на анализируемой сцене должен быть контраст температур, поэтому температура окружающей среды должна быть несколько ниже или выше температуры дорожного полотна. Так, в зимних условиях при наличия снега полотно дороги сливается с фоном и тепловизионный канал становится непригодным для задачи выделения границ дороги. С другой стороны, тепловизионный канал позволяет СТЗ более достоверно детектировать живые и некоторые искусственные препятствия (припаркованные автомобили) за счет их температурного контраста с окружающей средой. Причем, данное наблюдение подтверждается и тяжелых зимних условиях (Рис. 5), когда лазерный сканирующий дальномер и телевизионная камера недостаточно стабильно детектируют препятствия. С другой стороны, получаемые данные с тепловизора позволяют измерить распределение абсолютной температуры наблюдаемой поверхности, что позволяет автоматически понимать мгновенные погодные условия и адаптивно менять веса значимости потоковых данных всех сенсоров.



а *б*

Рис. 5. Изображение искусственного препятствия (припаркованный автомобиль) на дорожной сцене в условиях снегопада а) в телевизионном диапазоне и б) в тепловизионном диапазоне

По результатам испытаний разработанного макета и алгоритмического обеспечения СТЗ можно констатировать факт значимости тепловизионного канала в задаче распознавания дорожных сцен и перспективности массового использования тепловизоров в системах технического зрения мобильных роботов. Предложенный в данной работе подход позволяет существенно расширить диапазон рабочих условий, спектр решаемых задач, а также повысить общую эффективность СТЗ (полнота и точность распознавания, быстродействие).

1. Huang, L. and Barth, M. A novel laser scanner-computer vision mobile sensing system for automatic navigation. In: Proceedings of International Transport System Conference, Beijing, China, 2008.
2. В.П. Носков, А.А. Ханин. Комплексирование светолокационных и телевизионных данных в задачах выделения дороги // Вестник МГТУ, 2012 г.
3. Harris, C., Stephens, M. A Combined Corner and Edge Detector, Proceedings of 4th Alvey Vision Conference, 1988.
4. Носков А.В., Рубцов И.В., Романов А.Ю. Формирование объединенной модели внешней среды на основе информации видеокамеры и дальномера. / Ж. Мехатроника, автоматизация, управление. // М.: Из-во «Новые технологии», 2007. №8, С. 2-5.

A. Belyaev, O. Lapin, V. Mikutcky, V. Soloviev, I. Shishov

THE DEVICE OF DETECTING OF NEUTRONS IN THE CONDITIONS OF HIGH-INTENSITY HINDRANCES FROM DIFFERENT TYPES OF IONIZING RADIATION

RTC, Saint-Petersburg, Russia
lapin@rtc.ru

А.Н. Беляев, О.Е. Лапин, В.Г. Микуцкий, В.Е. Соловьев, И.И. Шишов

УСТРОЙСТВО ДЕТЕКТИРОВАНИЯ НЕЙТРОНОВ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫХ ПОМЕХ ОТ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург
lapin@rtc.ru

Современные атомная промышленность, ядерная энергетика, военная и космическая техники нуждаются в разработках устройства детектирования ионизирующего излучения нового поколения, способного работать в экстремальных условиях – повышенных уровнях радиации, температуры и других внешних воздействующих факторов. Проблема создания таких приборов весьма актуальна для обеспечения безопасности работы на атомных и космических станциях, при утилизации ядерных отходов и работе в радиоактивно загрязненных районах, в том числе с применением робототехнических средств.

В работе приведены результаты исследований, полученных при разработке устройства детектирования плотности потока нейтронов (УДПН).

УДПН предназначено для осуществления радиационного контроля на радиационноопасных объектах при эксплуатации, как в наземных условиях, так и в космическом пространстве на транспортных космических системах, оснащенных ядерными энергетическими установками.

УДПН должно обеспечивать заданные метрологические характеристики при наличии высокоинтенсивных помех от различных видов ионизирующих излучений (протонов, электронов и гамма-квантов).

Для регистрации нейтронов в устройствах радиационного контроля используется, как правило, полиэтиленовый замедлитель и детектор тепловых нейтронов. В качестве детектора тепловых нейтронов может быть применен ионно-имплантированный кремниевый детектор, выполненный в виде тонкой пластины (толщиной порядка 0,3 мм), на чувствительную поверхность которой нанесен тонкий слой конвертера, например, на основе карбида бора. Конвертер, за счет ядерных реакций, преобразует поток нейтронов в поток альфа-частиц, которые, вылетая из пленки конвертера, регистрируются кремниевой пластиной.

В отличие от традиционных конструкций устройств детектирования нейтронов, в УДПН в качестве детектора тепловых нейтронов используется не одна, а две кремниевые пластины. Одна из них, с нанесенным на ее поверхность конвертером, предназначена для регистрации тепловых нейтронов, а вторая пластина не содержит конвертер и играет роль охранного детектора для выделения фонового излучения. Во второй пластине тепловые нейтроны практически не регистрируются, но, как и в первой пластине, в ней регистрируются другие виды излучений, создающие помеху при регистрации нейтронов.

Вторая пластина кремния размещена в УДПН параллельно первой и находится на расстоянии не более 0,5 мм. Сигналы с двух кремниевых детекторов поступают на двухканальный усилитель, затем на устройство выделения сигналов по принципу антисовпадений и далее на устройство обработки сигналов для вычисления характеристик регистрируемых излучений.

Охранный детектор позволяет выделить фоновые сигналы, обусловленные потоками высокоэнергетичного излучения протонов, электронов и гамма-квантов, от которых защитить детектор физическим экраном практически невозможно. Для защиты устройства детектирования от влияния низкоэнергетического фонового излучения в УДПН используется экран вокруг кремниевых пластин, выполненный из сплава железа.

С целью определения оптимальных параметров конструкции УДПН с помощью программы имитационного трехмерного моделирования систем регистрации ионизирующих излучений, реализующей статистический метод Монте-Карло, рассчитывался спектр поглощенной энергии в кремниевых пластинах, включенных по схеме антисовпадений, при облучении УДПН нейтронами, гамма-квантами, протонами и электронами различных энергий.

Анализ результатов моделирования позволил определить оптимальную геометрию устройства детектирования, найти оптимальное соотношение между площадями пластин кремния и толщиной конвертера, получить эффективность регистрации тепловых нейтронов при различных исходных спектрах нейтронов, провести оценку величины фонового сигнала.

На основе полученных результатов исследований ведется разработка и изготовление макета УДПН, планируется проведение экспериментальных исследований с целью определения его метрологических характеристик и сравнения полученных экспериментальных результатов с результатами моделирования.

ДЛЯ ЗАМЕТОК

NOTES

Труды
международной научно-технической конференции

ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ РОБОТОТЕХНИКА

8-9 октября 2015 года, Санкт-Петербург

Proceedings
of the International Scientific and Technological Conference

EXTREME ROBOTICS

October 8-9, 2015, Saint-Petersburg, Russia

ISBN 978-5-906782-77-9

9 785906 782779

Подписано в печать 25.09.2015
Формат 60x84$^{1}/_{8}$. Печать – цифровая.
Тираж 200 экз. Объем 46,75 п.л.
Бумага офсетная. Заказ №5492.
Отпечатано в типографии «Политехника-сервис»
с оригинал-макета заказчика.


ДЕЛОВОЙ ЖУРНАЛ
WWW.DFNC.RU
NEW DEFENCE ORDER
STRATEGY
НОВЫЙ
ОБОРОННЫЙ
ЗАКАЗ
СТРАТЕГИИ
+7 (812) 309-2724