Труды
Международной научно-технической конференции

ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ РОБОТОТЕХНИКА

24-25 ноября 2016 года, Санкт-Петербург

Proceedings
of the International Scientific and Technological Conference

EXTREME ROBOTICS

November 24-25, 2016, Saint-Petersburg, Russia

er.rtc.ru

УДК 004.896.007.52
ББК 32813
Э41

ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ РОБОТОТЕХНИКА. // Труды Международной научно-технической конференции. – Санкт-Петербург: ООО «АП4Принт», 2016. – 480 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-2016)».

Проект реализован при финансовой поддержке Минобрнауки России, г/к № 14.598.11.0090 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: «AP4Print», 2016. – 480 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-2016)».

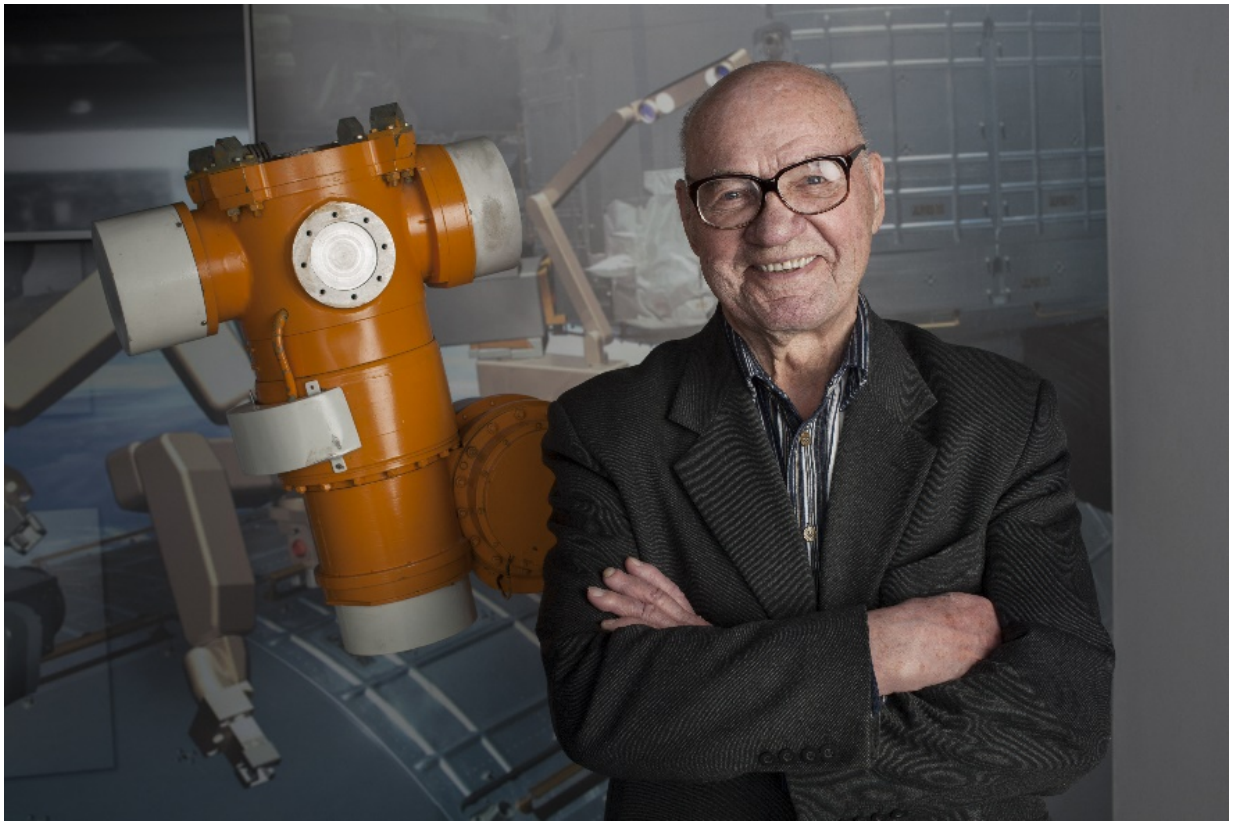
The project is held under financial support of Ministry of Education and Science of the Russian Federation

Reports are published with author's correction only.

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

ISBN 978-5-9909163-3-3

© ЦНИИ робототехники и технической кибернетики, 2016



25 ноября 2016 года 90-летний юбилей отмечает основатель ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, председатель программного комитета научно-технической конференции «Экстремальная робототехника», Почетный главный конструктор ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, д-р техн. наук, профессор кафедры «Мехатроника и роботостроение» при ГНЦ РФ ЦНИИ РТК – Евгений Иванович Юревич.

On November 25, 2016 90-year anniversary is celebrated by the founder of CRDI RTC, Chairman of Program Committee of a Scientific and Technical Conference «Extreme Robotics», Honorary Chief Designer of CRDI RTC, Dr.Sci.Tech., professor of Mechatronics and Robotics Department at CRDI RTC – Evgeny Ivanovich Yurevich.

Уважаемые коллеги!

От имени Министерства образования и науки Российской Федерации и от себя лично приветствую участников 26-ой Международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника».

Сегодня уровень развития робототехники является одним из важнейших показателей научного, промышленного, общественного и военного потенциала любого государства. От успехов в данной области зависит прогресс в машиностроении, приборостроении, энергетической сфере, освоении космоса, развитии телекоммуникаций, биотехнологий и ряде других ключевых направлений 21 века.

Именно поэтому так важно объединить усилия всех заинтересованных сторон для решения задач, стоящих перед исследователями и разработчиками, для подготовки молодых специалистов, для развития высокотехнологичных производств.

Я рад, что конференция в очередной раз собрала на своей площадке представителей мирового научного сообщества, силовых министерств и ведомств России, бизнеса и промышленности для совместного решения научно-технических задач.

Уверен, что результаты конференции внесут достойный вклад в решение приоритетных для развития робототехники задач, расширению деловых контактов и продвижению отечественных разработок в области робототехники на мировые рынки.

Желаю участникам конференции
интересной и плодотворной работы,
успешных деловых и научных контактов!

Директор Департамента науки
и технологий Минобрнауки России

Dear Colleagues!

On behalf of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation and in my personal capacity I welcome participants of the 26th International scientific and technical Extreme Robotics Conference.

Today the level of robotics development is one of the most important indicators of scientific, industrial, public and military potential of any State. The progress in mechanical engineering, instrument making, energy engineering, space exploration, development of telecommunications, biotechnologies, and in some other key directions of 21 century depends on the robotics.

This is precisely why it is so important to combine efforts of all interested parties to meet challenges, facing researchers and developers, to train young specialists, to develop hi-tech production.

I'm glad that the Conference platform has once again brought together representatives of the world scientific community, of the power ministries and agencies (или, как вариант, structures) of Russia, of business and industry to jointly address scientific and technical issues.

I believe that results of the Conference will make worthy contribution to the solution of prior for development of robotics tasks, to the expansion of business contacts and promotion of national developments in robotics to the world markets.

I wish to Conference participants interesting and fruitful 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
Sergey Salikhov

Уважаемые коллеги!

Приветствую участников 26-й Международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника» в государственном научном центре Российской Федерации «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики».

В наше время трудно представить сферу, в которой не использовались бы достижения в области робототехники, и, в ближайшем будущем, её значение будет только возрастать.

Я рад, что на конференции «Экстремальная робототехника» собираются вместе представители международного научного сообщества для свободного обмена идеями и совместного поиска решений задач, стоящих перед учеными. Недаром наша конференция вот уже много лет заслуженно является традиционной площадкой для ведения профессионального содержательного диалога по ключевым вопросам развития робототехники.

На протяжении 26-ти лет бессменным председателем программного комитета конференции является Почетный главный конструктор ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, д-р техн. наук, профессор Евгений Иванович Юревич, отмечающий в этом году 90-летний юбилей.

Дорогой Евгений Иванович, поздравляю Вас с юбилеем! Желаю и в дальнейшем оставаться генератором научно-технических идей, талантливым ученым-педагогом, способным увлекать своими новаторскими идеями молодых специалистов.

Желаю участникам конференции «Экстремальная робототехника» новых открытий, расширения круга друзей и партнеров. Уверен, что и на этот раз её работа пройдет в деловой и дружеской атмосфере, откроет новые возможности для конструктивного обмена мнениями и развития взаимовыгодного сотрудничества.

Директор-главный конструктор
ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, канд. экон. наук

Dear Colleagues!

I welcome participants of the 26th International Scientific and Technical «Extreme Robotics» Conference in the Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics (CRDI RTC).

Today it is difficult to imagine the sphere where advances in robotics aren't used, and in the near future its importance in all spheres of life will only increase.

I'm glad that the Extreme Robotics Conference brought together the representatives of the international scientific community for free exchange of the ideas and joint search for solutions of the tasks facing scientists.

Not without reason our Conference deservedly has been the traditional platform for conducting professional and meaningful dialogue on key issues of robotics development for many years.

The Honorary Chief Designer of CRDI RTC, Dr.Sci.Tech., professor Evgeny Ivanovich Yurevich, has been the permanent chairman of Program Committee of a Conference for 26 years. He celebrates 90-year anniversary this year.

Dear Evgeny Ivanovich, I congratulate you on anniversary! May you remain the generator of the scientific and technical ideas, the talented scientist and educator, who is capable of inspiring young specialists by the innovative ideas in future as well.

I wish to Extreme Robotics Conference participants new discoveries, expansion of a circle of friends and partners. I'm positive, that its work will again take place in a business-friendly atmosphere, will open new opportunities for constructive exchange of opinions and development of mutually beneficial cooperation.

Director-Chief Designer CRDI RTC,
Ph.D. in Economics

А.В. Лопота
Alexander Lopota

ОРГАНИЗАТОР

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

ПРИ ПОДДЕРЖКЕ

- *Министерства 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*
- *Российской академией наук*
- *Ассоциации государственных научных центров «Наука»*
- *Правительства Санкт-Петербурга*

ИНФОРМАЦИОННАЯ ПОДДЕРЖКА

- *Теоретический и прикладной научно-технический журнал «Мехатроника, автоматизация, управление» (рекомендован ВАК), Москва*
- *Журнал «Новый Оборонный Заказ. Стратегии», Санкт-Петербург*
- *Журнал «Робототехника и техническая кибернетика», Санкт-Петербург*

ORGANIZER

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

WITH SUPPORT OF

- *Ministry of Education and Science of the Russian Federation*
- *EMERCOM of Russia*
- *Ministry of Defence of the Russia*
- *Federal Space Agency*
- *Russian Academy of Sciences*
- *State Scientific Centers of the Russian Federation Association*
- *Government of St. Petersburg*

INFORMATION SUPPORT

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

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

Председатель:

- ***Юревич Евгений Иванович**, д-р техн. наук, профессор СПбПУ, Почетный главный конструктор ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург; член Научного совета РАН по робототехнике и мехатронике*

Заместитель председателя:

- ***Грязнов Николай Анатольевич**, канд. физ.-мат. наук, заместитель директора по научной работе ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург*

Ученый секретарь:

- ***Павлов Владимир Анатольевич**, канд. техн. наук, начальник отдела ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург*

Члены программного комитета:

- ***Андреев Виктор Павлович**, д-р техн. наук, профессор МГТУ «Станкин», Москва*
- ***Брискин Евгений Самуилович**, д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой ВолгГТУ, Волгоград*
- ***Градецкий Валерий Георгиевич**, д-р техн. наук, 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-р техн. наук, профессор СПбПУ; директор института компьютерных наук и технологий СПбПУ, заведующий кафедрой «Телематика» при ГНЦ РФ ЦНИИ РТК; заместитель главного конструктора ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург; член Международной ассоциации академических, исследовательских и промышленных предприятий (IARIA)*
- ***Максимов Алексей Алексеевич**, директор НУЦ «Робототехника» МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва*
- ***Павловский Владимир Евгеньевич**, д-р физ.-мат. наук, профессор, ведущий научный сотрудник ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, Москва; член Научного совета РАН по робототехнике и мехатронике*
- ***Подураев Юрий Викторович**, д-р техн. наук, профессор, проректор по учебной работе, заведующий кафедрой МГТУ «СТАНКИН», Москва; член Научного совета РАН по робототехнике и мехатронике*
- ***Пряничников Валентин Евгеньевич**, д-р техн. наук, профессор ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, Москва; представитель Международной ассоциации по автоматизации в машиностроении (DAAAM International Vienna) в России*
- ***Филимонов Николай Борисович**, д-р техн. наук, профессор, главный редактор ежемесячного научно-технического и производственного журнала «Мехатроника, автоматизация, управление (МАУ)», Москва*
- ***Ющенко Аркадий Семенович**, д-р техн. наук, профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва*

PROGRAM COMMITTEE

Chairman:

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

Deputy Chairman:

- ***Gryaznov Nikolai**, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Deputy Director for Science, CRDI RTC, Saint-Petersburg*

Academic Secretary:

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

Members of Program Committee:

- ***Andreev Victor**, Doctor of Technical Sciences, Professor of Moscow State Technical University of Technology «STANKIN», Moscow*
- ***Briskin Eugeny**, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of Chair, Volgograd State Technical University, Volgograd*
- ***Filimonov Nikolai**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Editor of monthly scientific-and-technological and production journal «Mechatronics, Automation and Control», Moscow*
- ***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*
- ***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 «DAAAM International Vienna» in Russia*
- ***Yushchenko Arkady** Doctor of Technical Sciences, Professor, Baumann State Technical University, Moscow*
- ***Zaborovsky Vladimir**, Doctor of Technical Sciences, Professor of St-Petersburg State Polytechnic University (SPbPU); Director of Institute of Computer Sciences and Technologies of SSPU; the head of the department «Telematics» at CRDI RTC; Deputy Chief Designer of CRDI RTC, Saint-Petersburg; member of the International Academy, Research and Industry Association (IARIA)*

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

Председатель:

- ***Лопота Александр Витальевич**, канд. экон. наук, директор-главный конструктор ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург*

Заместитель председателя:

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

Секретарь:

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

Члены организационного комитета:

- ***Буренок Василий Михайлович**, президент Российской академии ракетных и артиллерийских наук, Москва*
- ***Горская Ирина Васильевна**, генеральный директор Ассоциации ГНЦ «Наука», Москва*
- ***Ермолов Иван Леонидович**, канд. техн. наук, МГТУ «СТАНКИН»; ученый секретарь Научного совета РАН по робототехнике и мехатронике; представитель Европейской ассоциации по робототехнике (EURON)*
- ***Иванов Александр Владиславович**, заместитель директора ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург*
- ***Максимов Андрей Станиславович**, председатель Комитета по науке и высшей школе Санкт-Петербурга*
- ***Кондратьев Александр Сергеевич**, канд. техн. наук, заместитель директора ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург*
- ***Михайлов Борис Борисович**, канд. техн. наук, доцент МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва*
- ***Катенев Владимир Иванович**, президент Санкт-Петербургской торгово-промышленной палаты*
- ***Юдин Виктор Иванович**, канд. физ.-мат. наук, заместитель директора ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург*

ORGANIZING COMMITTEE

Chairman:

- ***Lopota Alexander**, Doctor in Economics, Director and Chief Designer of CRDI RTC, Saint-Petersburg*

Deputy Chairman:

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

Secretary:

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

Members of organizing committee:

- ***Burenok Vasiliy**, President of the Russian Academy of Rocket and Artillery Sciences, Moscow*
- ***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*
- ***Ivanov Alexander**, Deputy Director of CRDI RTC, Saint-Petersburg*
- ***Katenev Vladimir**, President of Saint-Petersburg Chamber of Commerce and Industry*
- ***Kondratyev Alexander**, Doctor of Technical Sciences, Deputy Director of CRDI RTC, Saint-Petersburg*
- ***Maksimov Andrey**, Chairman of Committee for Education and Higher School of Saint-Petersburg*
- ***Mikhailov Boris**, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor in Baumann State Technical University, Moscow*
- ***Yudin Victor**, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Deputy Director of CRDI RTC, Saint-Petersburg*

СОДЕРЖАНИЕ CONTENTS

ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ / PLENARY SESSION 16
V.M. Lokhin, S.V. Manko, M.P. Romanov DEVELOPING TECHNOLOGIES OF FINITE-STATE AUTOMATA THEORY APPLICTION FOR MULTY-AGENT ROBOTIC SYSTEMS CONTROL 16
В.М. Лохин, С.В. Манько, М.П. Романов РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИМЕНЕНИЯ АППАРАТА ТЕОРИИ АВТОМАТОВ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ МНОГОАГЕНТНЫМИ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ 20
V.G.Gradetsky, I.L.Ermolov, M.M. Knyazkov, E.A. Semyonov, S.A. Sobolnikov, A.N. Sukhanov SCIENTIFIC TASKS OF IMPLEMENTING TRANSPORTATION TASKS BY GROUPS OF UGVS 25
В.Г. Градецкий, И.Л. Ермолов, М.М. Князьков, Е.А. Семенов, С.А. Собольников, А.Н. Суханов О НАУЧНЫХ ЗАДАЧАХ ВЫПОЛНЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ ОПЕРАЦИЙ ГРУППОЙ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ 25
R.A. Afanasiev, I.L. Ermolov FUTURE OF ROBOTS FOR PRECISION AGRICULTURE 30
Р.А. Афанасьев, И.Л. Ермолов О ПЕРСПЕКТИВАХ РОБОТИЗАЦИИ ТОЧНОГО ЗЕМЛЕДЕЛИЯ 30
I.B. Sheremet, N.A. Rudianov, A.V. Ryabov, V.S. Khruschev ABOUT NEED OF THE CONCEPTS DEVELOPMENT OF CONSTRUCTION AND APPLICATION OF MILITARY AUTONOMOUS ROBOTIC SYSTEMS 35
И.Б. Шеремет, Н.А. Рудианов, А.В. Рябов, В.С. Хрущев О НЕОБХОДИМОСТИ РАЗРАБОТКИ КОНЦЕПЦИИ ПОСТРОЕНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ АВТОНОМНЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ 35
V.P. Andreev, Yu.V. Poduraev FUNCTIONAL–MODULAR DESIGN OF HETEROGENEOUS MOBILE ROBOTIC SYSTEMS 39
В.П. Андреев, Ю.В. Подураев ФУНКЦИОНАЛЬНО-МОДУЛЬНЫЙ ПРИНЦИП ПОСТРОЕНИЯ ГЕТЕРОГЕННЫХ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ 44
J. Artigas, C. Riecke, B. Weber, M. Stelzer, R. Balachandran, S. Schaetzle, R. Bayer, M. Steinmetz, J. Voegl, B. Brunner, A. Albu-Schaeffer, M. Guk, V. Zaborovskyi, A. Kondratiev, V. Muliukha, A. Silinenko, O. Shmakov FORCE-FEEDBACK TELEOPERATION OF ON-GROUND ROBOTS FROM THE INTERNATIONAL SPACE STATION IN THE FRAME OF THE «KONTUR-2» EXPERIMENT 50
Дж. Артигас, Ц. Райке, Б. Вебер, М. Штельцер, Р. Балачандран, С. Шаетцл, Р. Баер, М. Штеймец, Дж.Вогель, Б. Брюнер, А. Албу-Шафер, М. Гук, В. Заборовский, А. Кондратьев, В. Мулюха, А. Силиненко, О. Шмаков ТЕЛЕУПРАВЛЕНИЕ НАЗЕМНЫМ РОБОТОМ С СИЛОМОМЕНТНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ С БОРТА МЕЖДУНАРОДНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ В РАМКАХ КОСМИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА «КОНТУР-2» 57
ТЕОРИЯ И МЕТОДЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ РТС / THEORY AND DESIGN METHODS OF RTS 66
A.A. Tachkov CONCEPTUAL DESIGN OF MOBILE ROBOTS USING STATISTACAL SIMULATION 66
А.А. Тачков КОНЦЕПТУАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ СТАТИСТИЧЕСКОГО ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ 66
A. Karpov, B. Kryuchkov, A. Ronzhin, V. Usov DESIGNING HUMAN-ROBOT INTERACTION IN A UNITED TEAM OF COSMONAUTS AND AUTONOMOUS MOBILE ROBOTS ON THE LUNAR SURFACE 71
А.А. Карпов, Б.И. Крючков, А.Л. Ронжин, В.М. Усов ПРОЕКТИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЧЕЛОВЕК–РОБОТ В СОСТАВЕ ЕДИНОЙ КОМАНДЫ КОСМОНАВТОВ И АВТОНОМНЫХ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ НА ПОВЕРХНОСТИ ЛУНЫ 76
F.M. Kulakov METHODS OF THE CREATING OF GROUND-BASED CONTROL COMPLEX FOR THE REMOTE-CONTROLLED SPACE ROBOTS 81
Ф.М. Кулаков МЕТОДЫ ОРГАНИЗАЦИИ НАЗЕМНОГО УПРАВЛЯЮЩЕГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ТЕЛЕУПРАВЛЯЕМЫХ КОСМИЧЕСКИХ РОБОТОВ 81
L.A. Martynova, A.I. Mashoshin FEATURES OF EVALUATING THE PERFORMANCE OF AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE IN EMERGENCY SITUATIONS 86
Л.А. Мартынова, А.И. Машошин ОСОБЕННОСТИ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АВТОНОМНЫХ НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ В НЕШТАТНЫХ СИТУАЦИЯХ 86
A. Lukashin, V. Zaborovsky, L. Laboshin DATA ANALYSIS FOR NETWORK CYBER-SECURITY WITH THE BIG DATA PROCESSING TECHNOLOGIES 91
А.А. Лукашин, В.С. Заборовский, Л.Ю. Лабошин ОБЕСПЕЧЕНИЕ КИБЕРБЕЗОПАСНОСТИ СЕТЕВОГО ТРАФИКА С ПОМОЩЬЮ ТЕХНОЛОГИЙ ОБРАБОТКИ БОЛЬШИХ ДАННЫХ 91
S.G. Kapustyan, L.Zh. Usachev, A.A. Dyachenko THE WAY OF FORMATION TASK SOLVING FOR A GROUP OF UNMANNED 93
С.Г. Капустян, Л.Ж. Усачев, А.А. Дьяченко СПОСОБ РЕШЕНИЯ СТРОЕВОЙ ЗАДАЧИ ДЛЯ ГРУППЫ БЛА САМОЛЕТНОГО ТИПА. 93
A.V. Ananiev, G.A. Kaschenko A CHOICE OF RATIONAL VERSION OF AN AEROPORTABLE NETWORK ON THE BASIS OF UNMANNED AERIAL VEHICLES FOR SUPPORT OF CONNECTION OF TACTICAL SUBDIVIDINGS 98

А.В. Ананьев, Г.А. Кащенко ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНОГО ВАРИАНТА АЭРОМОБИЛЬНОЙ СЕТИ НА БАЗЕ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СВЯЗИ ТАКТИЧЕСКИХ ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ. 98
P.P. Byelonozhko QUALITATIVE ANALYSIS OF PLANE INERTIAL MOTIONS OF ONE-DEGREE SPACE MANIPULATOR ON MOVABLE PLATFORM 103
П.П. Белоножко КАЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ ПЛОСКИХ ИНЕРЦИОННЫХ ДВИЖЕНИЙ ОДНОСТЕПЕННОГО КОСМИЧЕСКОГО МАНИПУЛЯТОРА НА ПОДВИЖНОМ ОСНОВАНИИ 104
V.Ya. Vilisov RISK PRONENESS ESTIMATION METHOD DEVELOPED IN RELATION TO THE DECISION TAKER THAT CONTROLS THE ROBOTIC SYSTEM 109
В.Я. Вилисов МЕТОД ОЦЕНИВАНИЯ СКЛОННОСТИ К РИСКУ ЛПР, УПРАВЛЯЮЩЕГО РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ. 114
V.A. Lavrukhin, G.A. Fokin DESIGNING THE MIMO SDR-BASED LPD TRANSCEIVER FOR LONG-RANGE ROBOT CONTROL APPLICATIONS 119
В.А. Лаврухин, Г.А. Фокин РАЗРАБОТКА LPD-ПРИЕМОПЕРЕДАТЧИКА С ПОДДЕРЖКОЙ MIMO НА ОСНОВЕ ПРОГРАММНО-КОНФИГУРИРУЕМОГО РАДИО В ПРИЛОЖЕНИИ К УПРАВЛЕНИЮ РОБОТОМ 124
B. Leskov, E. Seliverstova CALCULATION OF FORCES OF CONTACT INTERACTION BETWEEN DEFORMABLE OBJECT AND FINGERS OF ROBOTIC GRIPPER 129
А.Г. Лесков, Е.В. Селиверстова РАСЧЕТ СИЛ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МЕЖДУ ДЕФОРМИРУЕМЫМ ОБЪЕКТОМ И ЗВЕНЬЯМИ ЗАХВАТНОГО УСТРОЙСТВА МАНИПУЛЯТОРА 129
M. Arkhipov, V. Golovin, E. Vzhesnevski RESEARCH OF OPERATING MODES OF SERVICE MANIPULATION ROBOT INTERACTING WITH A DEFORMABLE ELASTIC MEDIUM 134
М.В. Архипов, В.Ф. Головин, Е.А. Вжесневский ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СЕРВИСНОГО МАНИПУЛЯЦИОННОГО РОБОТА ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩЕГО С ДЕФОРМИРУЕМОЙ УПРУГОЙ СРЕДОЙ 134
V.N. Kazmin, V.P. Noskov FORMATION OF GEOMETRIC AND SEMANTIC MODELS OF ENVIRONMENT IN MOTION CONTROL PROBLEMS 138
В.Н. Казьмин, В.П. Носков ФОРМИРОВАНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ И СЕМАНТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ВНЕШНИХ СРЕД В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ 139
M.B. Ignatyev, J.A. Lipinskiy, A.A. Litovkin GRAVITATIONAL TRACTOR SIMULATION FOR ASTEROID HAZARD FIGHTING 142
М.Б. Игнатьев, Я.А. Липинский, А.А. Литовкин МОДЕЛИРОВАНИЕ ГРАВИТАЦИОННОГО ТЯГАЧА ДЛЯ БОРЬБЫ С АСТЕРОИДНОЙ ОПАСНОСТЬЮ 142
A.O. Panov, A.A. Ivanov, A.V. Rogov, O.A. Shmakov DYNAMIC SIMULATION OF THE MICRO-ROBOT ON A VEHICLE WITH STAR-LIKE WHEELS 144
А.О. Панов, А.А. Иванов, А.В. Рогов, О.А. Шмаков МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ДВИЖЕНИЯ МИКРОРОБОТА НА ПЛАТФОРМЕ СО ЗВЁЗДООБРАЗНЫМИ КОЛЁСАМИ 144
V.V. Varlashin, A.A. Ivanov, A.V. Rogov, O.A. Shmakov MODELING THE GAITS OF A WALKING ROBOT ON A PLANE 149
В.В. Варлашин, А.А. Иванов, А.В. Рогов, О.А. Шмаков МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОХОДОК ШАГАЮЩЕГО РОБОТА НА ПЛОСКОСТИ 149
A.A. Ghukasyan ON THE MODELING OF MAINTENANCE PROCESSES OF TECHNOLOGICAL AREA BY MANIPULATOR 153
А.А. Гукасян О МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЦЕССА ОБСЛУЖИВАНИЯ МАНИПУЛЯТОРОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УЧАСТКА. 156
A.V. Rekhlov, D.A. Demidov, O.A. Shmakov APPROACH TO DEVELOPMENT OF CONTROL SYSTEM FOR SMALL UAV 159
А.В. Рехлов, Д.А. Демидов, О.А. Шмаков МЕТОДИКА РАЗРАБОТКИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ МИКРО И СРЕДНЕГО КЛАССОВ. 160
E.S. Lomaev, A.B. Smirnov, A.V. Rogov TWO-AXIS SYSTEM FOR DEFLECTION OF LASER BEAM 163
Е.С. Ломаев, А.Б. Смирнов, А.В. Рогов ДВУХКООРДИНАТНЫЕ СИСТЕМЫ ОТКЛОНЕНИЯ ЛАЗЕРНОГО ЛУЧА 163
УПРАВЛЕНИЕ РТС И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ / RTS CONTROL AND INFORMATION SUPPORT 167
E.Yu. Kolesnichenko, V.E. Pavlovsky EXPLICIT SYNTHESIS OF MOTION CONTROL OF WHEELED MECANUM-ROBOT ALONG THE CURVED TRAJECTORY 167
Е.Ю. Колесниченко, В.Е. Павловский ЯВНЫЙ СИНТЕЗ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ КОЛЕСНОГО МЕКАНУМ-РОБОТА ПО КРИВОЛИНЕЙНОЙ ТРАЕКТОРИИ. 171
K.I. Kiy SYSTEM FOR COMPLEX ANALYSIS OF ROAD SCENES FOR NAVIGATION OF AN AUTONOMOUS ROBOT ON ROADS 176
К.И. Кий СИСТЕМА КОМПЛЕКСНОГО АНАЛИЗА ДОРОЖНОЙ СЦЕНЫ ДЛЯ НАВИГАЦИИ АВТОНОМНОГО РОБОТА НА ДОРОГЕ. 180
A.A. Andreychuk, A.V. Bokovoy, K.S. Yakovlev VAN EMPIRICAL EVALUATION OF GRID-BASED PATH PLANNING ALGORITHMS ON WIDELY USED IN ROBOTICS RASPBERRY PI PLATFORM 184

А.А. Андрейчук, А.В. Боковой, К.С. Яковлев ОЦЕНКА БЫСТРОДЕЙСТВИЯ НЕКОТОРЫХ АЛГОРИТМОВ ПЛАНИРОВАНИЯ ТРАЕКТОРИИ НА ШИРОКО ИСПОЛЬЗУЕМОЙ В РОБОТОТЕХНИКЕ ПЛАТФОРМЕ RASPBERRY PI 184
A.E. Gavrilov OBTAINING A LAWS OF MOTION FOR WALKING MOBILE ROBOT OCTOPOD-1 189
А.Е. Гаврилов ПОЛУЧЕНИЕ ЗАКОНОВ ПРОГРАММНЫХ ДВИЖЕНИЙ МОБИЛЬНОГО ШАГАЮЩЕГО РОБОТА ОКТОПОД-1 193
M.B. Ignatyev, D.V. Kuzmin, J.A. Popov OBSTACLES OVERCOMING PATTERNS FOR STEPPING ROBOTS..... 198
М.Б. Игнатьев, Д.В. Кузьмин, Ю.А. Попов ПАТТЕРНЫ ПРЕОДОЛЕНИЯ ПРЕПЯТСТВИЙ ШАГАЮЩИМИ РОБОТАМИ 198
S.V. Haruzin, A.A. Ivanov, O.A. Shmakov SITUATIONAL CONTROL OF THE SIX-WHEEL VEHICLE WITH THE TRANSFORMED FRAME 201
С.В. Харузин, А.А. Иванов, О.А. Шмаков СИТУАЦИОННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ШЕСТИКОЛЁСНОЙ ПОВОЗКОЙ С ТРАНСФОРМИРУЕМОЙ РАМОЙ. 201
S.H. Zabihifar, A.C. Yushchenko ROBUST ADAPTIVE NEURAL NETWORK CONTROL OF ROTARY INVERTED PENDULUM 206
С.Х. Забихифар, А.С. Ющенко РОБАСТНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ВРАЩЕНИЕМ ПЕРЕВЕРНУТОГО МАЯТНИКА С ПОМОЩЬЮ АДАПТИВНОЙ НЕЙРОНОЙ СЕТИ 215
I.V. Titkov, A.V. Lopota, O.A. Shmakov SOME FACTS ABOUT DEVELOPING OF CONTROL SYSTEM FOR ACTIVE EXOSKELETON 224
И.В. Титков, А.В. Лопота, О.А. Шмаков К ВОПРОСУ РАЗРАБОТКИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АКТИВНЫМ ЭКЗОСКЕЛЕТОМ. 225
S.F. Jatsun, S.I. Savin, A.S. Jatsun, A.V. Malchikov STUDY OF CONTROLLED FRONTAL PLANE MOTION OF AN EXOSKELETON IN THE VERTICAL BALANCE RECOVERY REGIME 236
С.Ф. Яцун, С.И. Савин, А.С. Яцун, А.В.Мальчиков ИЗУЧЕНИЕ УПРАВЛЯЕМОГО ДВИЖЕНИЯ ЭКЗОСКЕЛЕТА ВО ФРОНТАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ В РЕЖИМЕ ВОССТАНОВЛЕНИЯ РАВНОВЕСИЯ. 240
V.P. Andreev, P.F. Pletenev DEVELOPING INTER-MODULAR COMMUNICATION FOR HETEROGENEOUS MOBILE ROBOT 245
В.П. Андреев, П.Ф. Плетенев РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ МЕЖМОДУЛЬНОГО ОБЩЕНИЯ В ГЕТЕРОГЕННОМ МОДУЛЬНОМ МОБИЛЬНОМ РОБОТЕ. 250
V.V. Nikiforov, V.A. Pavlov EFFICIENCY OF COMPUTATIONAL RESOURCES SHARING BETWEEN TASKS IN ROBOT CONTROL SYSTEMS 255
В.В. Никифоров, В.А. Павлов ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАЗДЕЛЕНИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ РЕСУРСОВ МЕЖДУ ЗАДАЧАМИ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ РОБОТАМИ 255
Ф. Шнайдер, Б. Джесперс, А. Тидерко, О. Каторгин, Д. Вайлдермас БЕСПИЛОТНЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ РАДИОЛОГИЧЕСКОГО И ЯДЕРНОГО ИЗМЕРЕНИЯ И ОТОБРАЖЕНИЯ 261
Frank E. Schneider, Bastian Gaspers, Alexander Tiderko, Oleg Katorgin, Dennis Wildermuth UNMANNED SYSTEMS FOR RADIOLOGICAL AND NUCLEAR MEASURING AND MAPPING 261
V. Gradetsky, M. Knyazkov, O. Kotova, Eu. Semenov, A. Sukhanov, V. Chashchukhin PROBLEMS OF ADAPTATION TO SURFACES OF VACUUM CONTACT DEVICES OF ROBOTS 266
В.Г. Градецкий, М.М. Князьков, О.И. Котова, Е.А. Семенов, А.Н. Суханов, В.Г. Чащухин ПРОБЛЕМЫ АДАПТАЦИИ ВАКУУМНЫХ КОНТАКТНЫХ УСТРОЙСТВ РОБОТОВ К ПОВЕРХНОСТЯМ 271
V. Gorbunov, F. Kulakov PROJECT OF VISION SYSTEM FOR THE REMOTE-CONTROLLED SPACE ROBOTS 276
В.И. Горбунов, Ф.М. Кулаков СИСТЕМА ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ ТЕЛЕУПРАВЛЯЕМЫХ КОСМИЧЕСКИХ РОБОТОВ 277
A.Yu. Malykhin, S.V. Kalinichenko, A.A. Tachkov, A.G. Volkov SIMULATION MODEL OF ADHESION SYSTEM OF WALL-CLIMBING ROBOT WITH VACUUM CUPS 281
А.Ю. Малыхин, С.В. Калиниченко, А.А. Тачков, А.Г. Волков ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ УДЕРЖАНИЯ РОБОТА ВЕРТИКАЛЬНОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ С ВАКУУМНЫМИ ЗАХВАТАМИ 281
A.G. Leskov, S.D. Moroshkin COMPUTER VISION SYSTEM FOR OBJECTS POSE ESTIMATION 287
А.Г. Лесков, С.Д. Морошкин СИСТЕМА ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАСПОЛОЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ 287
A. Leskov, K. Bazhinova PLANNING AND EVALUATION SYSTEM FOR GRASPS WITH MANIPULATION ROBOTS 291
А.Г. Лесков, К.В. Бажинова СИСТЕМА ПЛАНИРОВАНИЯ И ОЦЕНКИ ЗАХВАТА ОБЪЕКТОВ МАНИПУЛЯЦИОННЫМ РОБОТОМ 291
A.A. Piskarev, B.B. Mikhailov PIPELINE JOINT BEVEL DETECTION METHODS USING 3D-VISION SYSTEM 295
А.А. Пискарёв, Б.Б. Михайлов МЕТОДЫ ВЫДЕЛЕНИЯ ФАСКИ НА СТЫКАХ ТРУБ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМЫ ОБЪЁМНОГО ЗРЕНИЯ 296
K.Y. Senchik, V.V. Harlamov, V.Y. Nekrasov, N.A. Gryaznov, G.S. Kireeva DEVELOPMENT OF WORKING ALGORITHMS OF THE NEW CARDIOCOMPRESSOR FOR CARDIOPULMONARY RESUSCITATION 300
К.Ю. Сенчик, В.В. Харламов, В.Ю. Некрасов, Н.А. Грязнов, Г.С. Киреева РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ РАБОТЫ НОВОГО КАРДИОКОМПРЕССОРА ДЛЯ СЕРДЕЧНО-ЛЕГОЧНОЙ РЕАНИМАЦИИ 305

T.M. Volosatova, A.M. Marchenkov, N.V. Chichvarin THE FEATURES OF A COMPUTER VISION WORKBENCH DESIGN BASED ON A KINECT SENSOR 310
Т.М. Волосатова, А.М. Марченков, Н.В. Чичварин ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО РАБОЧЕГО МЕСТА СИСТЕМ КОМЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ НА ОСНОВЕ СЕНСОРА KINECT 314
A.A. Ivanov, O.A. Shmakov INVARIANT DETERMINATION OF INTERNAL GEOMETRY OF A SERPENTINE MANIPULATOR FOR TRAJECTORY LEADING LINK 319
А.А. Иванов, О.А. Шмаков ИНВАРИАНТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВНУТРЕННЕЙ ГЕОМЕТРИИ ЗМЕЕВИДНОГО МАНИПУЛЯТОРА ПО ТРАЕКТОРИИ ЛИДИРУЮЩЕГО ЗВЕНА..... 319
S.L. Gerasuto, R.A. Prakapovich, V.A. Sychev INVESTIGATION OF WORK CONTROL SYSTEM PROTOTYPE OF SMALL-SIZED MOBILE INTERNET-ROBOT FOR THE «SMART HOUSE» MONITORING TASK 324
С.Л. Герасюто, Г.А. Прокопович, В.А. Сычёв ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОТОТИПА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МАЛОГАБАРИТНЫМ МОБИЛЬНЫМ ИНТЕРНЕТ-РОБОТОМ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ МОНИТОРИНГА В СИСТЕМАХ «УМНЫЙ ДОМ» 324
РАЗРАБОТКИ И ПРИМЕНЕНИЕ РТС / DEVELOPMENTS AND APPLICATION OFRTS 330
Dang Suan Hiep, A.P. Karpenko, S.N. Sayapin IN-PIPE PARALLEL ROBOT OF DODEKAPOD TYPE 330
Данг Суан Хиеп, А.П. Карпенко, С.Н. Саяпин ВНУТРИТРУБНЫЙ РОБОТ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ТИПА ДОДЕКАПОД 334
M.B. Ignatyev, P.I. Makin, J.A. Lipinskij ROBOTS FOR GAS PIPELINES DIAGNOSTICS 339
М.Б. Игнатьев, П.И. Макин, Я.А. Липинский РОБОТЫ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ГАЗОПРОВОДОВ 339
E.S. Lomaev, O.A. Shmakov, A.V. Rogov, D.M. Korolev SMALL-SIZED TREADED PLATFORM WITH DEPENDENT ARMS..... 344
Е.С. Ломаев, О.А. Шмаков, А.В. Рогов, Д.М. Королев МАЛОГАБАРИТНАЯ ПЛАТФОРМА НА БАЗЕ ГУСЕНИЧНОГО ШАССИ С ПАРОЙ ЗАВИСИМЫХ РЫЧАГОВ 344
N. Bykov, N. Vlasova, N. Buzlov A SMALL-SIZE MOBILE ROBOT: DEPELOPMING OF MOVING MECHANISM....346
Н.В. Быков, Н.С. Власова, Н.А. Бузлов РАЗРАБОТКА МЕХАНИЗМА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ МАЛОГАБАРИТНОГО МОБИЛЬНОГО РОБОТА 346
V.K. Barbasov AEROD – SYSTEM OF LANDING/RECHARGING FOR UNMANNED VERTICAL-TAKEOFF-AND-LANDING DRONE. USED FOR MAKING DRONS' AUTOMATED NETWORKS TO MONITOR AREAS AND INFRASTRUCTURE GUARDING 349
В.К. Барбасов AEROD - СИСТЕМА ПОСАДКИ/ПОДЗАРЯДКИ ДЛЯ БЕСПИЛОТНИКОВ ВЕРТИКАЛЬНОГО ВЗЛЕТА/ПОСАДКИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ, АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СЕТЕЙ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ДРОНОВ..... 349
K.A. Smirnov COMBINED ALGORITHM TO CONTROL AUTONOMOUS VEHICLE FOR TRACKING WITH MAXIMUM POSSIBLE SPEED 354
К.А. Смирнов КОМБИНИРОВАННЫЙ АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫМ АВТОМОБИЛЕМ ДЛЯ ДВИЖЕНИЯ ПО ТРАЕКТОРИИ С МАКСИМАЛЬНО ВОЗМОЖНОЙ СКОРОСТЬЮ 354
V.P. Andreev, V.L. Kim DEVELOPMENT OF FUNCTIONAL UNITS OF A HETEROGENEOUS MODULAR MOBILE ROBOT 359
В.П. Андреев, В.Л. Ким РАЗРАБОТКА ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ УЗЛОВ ГЕТЕРОГЕННОГО МОДУЛЬНОГО МОБИЛЬНОГО РОБОТА 363
E.A. Devyaterikov, B.B. Mikhailov USING OF VISUAL ODOMETER DATA FOR AUTOMATIC MOBILE ROBOT RETURN. RESULTS OF EXPERIMENTAL RESEARCH 369
Е.А. Девятериков, Б.Б. Михайлов ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ ВИЗУАЛЬНОГО ОДОМЕТРА ДЛЯ АВТОНОМНОГО ВОЗВРАЩЕНИЯ МОБИЛЬНОГО РОБОТА. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ 374
C.N. Saypin, M.S. Saypina SELF-PROPELLED MULTIFUNCTIONAL CUPPING-GLASS MASSAGER BASED ON ACTIVE TRIANGULAR MODULE PARALLEL STRUCTURE 379
С.Н. Саяпин, М.С. Саяпина САМОПЕРЕМЕЩАЮЩИЙСЯ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ БАНОЧНЫЙ МАССАЖЕР НА БАЗЕ АКТИВНОГО ТРЕУГОЛЬНОГО МОДУЛЯ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ 384
R.A. Munasypov, T.R. Shakhmametyev, S.S. Moskvichev, P.V. Sletnev, I.V. Meshkov HIGH MOBILITY ROBOTIC PLATFORM FOR SHIP STRUCTURAL ELEMENTS INSPECTION 389
Р.А. Мунасыпов, Т.Р. Шахмаметьев, С.С. Москвичёв, П.В. Слетнёв, И.В. Мешков РОБОТИЗИРОВАННАЯ ПЛАТФОРМА ВЫСОКОЙ МОБИЛЬНОСТИ ДЛЯ ЗАДАЧ ДИАГНОСТИКИ ЭЛЕМЕНТОВ СУДОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ 389
A.U. Sedov, I.B. Pryamitsyn, A.L. Korotkov, A.V. Rogov, O.A. Shmakov DESIGN INSTALLATION FEATURES OF THE DRIVES OF THREADED-PLATFORM WITH VARIABLE CONFIGURATION OF CHASSIS 393
А.Ю. Седов, И.Б. Прямицын, А.Л. Коротков, А.В. Рогов, О.А. Шмаков КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ РАЗМЕЩЕНИЯ ПРИВОДОВ ГУСЕНИЧНЫХ ПЛАТФОРМ С ИЗМЕНЯЕМОЙ ГЕОМЕТРИЕЙ ШАССИ 393
E.S. Briskin, I.P. Vershinina, Ya.V. Kalinin ON ENERGY-EFFICIENT ALGORITHMS OF THE WALKING ROBOT TURNING 395

Е.С. Брискин, И.П. Вершинина, Я.В. Калинин ОБ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИ ЭФФЕКТИВНЫХ АЛГОРИТМАХ ПОВОРОТА ШАГАЮЩИХ РОБОТОВ С ДВИЖИТЕЛЯМИ НА ОСНОВЕ СДВОЕННЫХ МЕХАНИЗМОВ ШАГАНИЯ 400
V. Muliukha, M. Guk, V. Zaborovsky NETWORK-CENTRIC SUPERVISORY CONTROL SYSTEM FOR ROBOTICS....405
В.А. Мулюха, М.Ю. Гук, В.С. Заборовский СИСТЕМА СУПЕРВИЗОРНОГО СЕТЕЦЕНТРИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ 405
I. Dalyaev, I. Shardyko EXPERIMENTAL MODEL OF A MANIPULATOR FOR ON-ORBIT SERVICING SPACECRAFT 411
И.Ю. Даляев, И.В. Шардыко МАКЕТНЫЙ ОБРАЗЕЦ МАНИПУЛЯЦИОННОЙ СИСТЕМЫ СЕРВИСНОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА 411
I.G. Sokhin, Yu.V. Lonchakov, V.A. Sivolap, M.V. Mikhailyuk, V.B. Sychkov EXPERIMENTAL ERGONOMIC STUDIES OF REMOTE INTERACTION BETWEEN COSMONAUTS AND ANTHROPOMORPHIC ROBOTIC ASSISTANTS USING VIRTUAL ENVIRONMENT TECHNOLOGIES 415
И.Г. Сохин, Ю.В. Лончаков, В.А. Сиволап, М.В. Михайлюк, В.Б. Сычков ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ЭРГОНОМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИСТАНЦИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОСМОНАВТОВ С АНТРОПОМОРФНЫМИ РОБОТАМИ ПОМОЩНИКАМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИЙ ВИРТУАЛЬНОГО ОКРУЖЕНИЯ 418
N.A. Pavluk, A.L. Ronzhin DESIGN SOLUTIONS FOR LOWER LIMB ANTHROPOMORPHIC ROBOT ANTARES....422
Н.А. Павлюк, А.Л. Ронжин КОНСТРУКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ НИЖНИХ КОНЕЧНОСТЕЙ ДЛЯ АНТРОПОМОРФНОГО РОБОТА АНТАРЕС 423
A.N. Afonin, A.Yu. Aleynikov, A.R. Gladyshev, A.V. Popova DESIGN AND IMPLEMENTATION OF LAYOUT BIONIC PROSTHETIC HAND BRUSH 428
А.Н. Афонин, А.Ю. Алейников, А.Р. Гладышев, А.В. Попова РАЗРАБОТКА И РЕАЛИЗАЦИЯ МАКЕТА БИОНИЧЕСКОГО ПРОТЕЗА КИСТИ РУКИ. 428
V. Bashlovkina, L. Boykov, L. Stankevich DELAY TOLERANT NETWORKING ARCHITECTURE USAGE IN A MANAGEMENT OF A GROUP OF ROBOTS 431
В.В. Башловкина, Л.В. Бойков, Л.А. Станкевич ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УСТОЙЧИВОЙ К РАЗРЫВАМ СЕТЕВОЙ АРХИТЕКТУРЫ ПРИ УПРАВЛЕНИИ ГРУППАМИ АВТОНОМНЫХ РОБОТОВ 431
V.V. Harlamov, S.A. Nikitin, D.V. Novitckiy, G.S. Kireeva, K.Y. Senchik, N.A. Gryaznov EVALUATION OF NEEDLE POSITIONING ERROR WHEN INSERTED IN THE PROSTATE PHANTOM UNDER ULTRASOUND GUIDANCE USING A NEEDLE MOTION DEVICE AS PART OF A ROBOTIC BRACHYTHERAPY SYSTEM 435
В.В. Харламов, С.А. Никитин, Д.В. Новицкий, Г.С. Киреева, К.Ю. Сенчик, Н.А. Грязнов ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ПРИ ВВЕДЕНИИ ИГЛЫ В ФАНТОМ ПРЕДСТАТЕЛЬНОЙ ЖЕЛЕЗЫ ПОД КОНТРОЛЕМ УЗИ С ПРИМЕНЕНИЕМ УСТРОЙСТВА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ИГЛ В СОСТАВЕ РОБОТИЗИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ БРАХИТЕРАПИИ 437
I.B. Pryamitsyn, A.U. Sedov, A.L. Korotkov, A.V. Rogov ASPECTS OF ELECTRICAL COMMUNICATIONS ROUTING IN SMALL-SIZED ROTARY JOINTS 439
И.Б. Прямицын, А.Ю. Седов, А.Л. Коротков, А.В. Рогов ОСОБЕННОСТИ ПРОКЛАДКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОММУНИКАЦИЙ В ПОДВИЖНЫХ ШАРНИРАХ МАЛЫХ ГАБАРИТНЫХ РАЗМЕРОВ 439
I.E. Novikov SOFTWARE COMPLEX FOR MATHEMATICAL SIMULATION OF PROCESSES OF TRANSFER AND REGISTRATION OF GAMMA-RADIATION FOR DEVELOPMENT OF SYSTEMS FOR THE EARTH'S SURFACE REMOTE RADIATION MONITORING 441
И.Э. Новиков ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА И РЕГИСТРАЦИИ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ СИСТЕМ ДИСТАНЦИОННОГО РАДИАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ 441
V.A. Pavlov STANDARDIZATION AFFAIRS IN THE FIELD OF ROBOTICS..... 447
В.А. Павлов ВОПРОСЫ СТАНДАРТИЗАЦИИ В ОБЛАСТИ РОБОТОТЕХНИКИ 447
A.S. Yushchenko, K.V. Ermishin COLLABORATIVE MOBILE ROBOTS - A NEW STAGE OF ROBOTICS 451
А.С. Ющенко, К.В. Ермишин КОЛЛАБОРАТИВНЫЕ МОБИЛЬНЫЕ РОБОТЫ – НОВЫЙ ЭТАП РАЗВИТИЯ РОБОТОТЕХНИКИ 455
B. Katalinic, A.Ya. Ksenzenko, S.V. Kuvshinov, Yu.S. Marzanov, E.A. Pryisev, V.E. Pryanichnikov, R.V. Khelemendik, S.R. Epikov THE DEVELOPMENT OF DISTRIBUTED SOFTWARE AND HARDWARE FOR «ROBOTARIUMS» 459
Б. Каталинич, А.Я. Ксензенко, С.В. Кувшинов, Ю.С. Марзанов, Е.А. Прысев, В.Е. Пряничников, Р.В. Хелемендик, С.Р. Эпиков РАЗРАБОТКА РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫХ РОБОТАРИУМОВ 460
V.E. Pryanichnikov, D.K. Stepanova PROTOTYPING LASER COMMUNICATIONS IN THE GROUP OF MOBILE ROBOTS 465
В.Е. Пряничников, Д.К. Степанова МАКЕТИРОВАНИЕ ЛАЗЕРНОЙ СВЯЗИ ГРУППЫ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ 465
Yu.R. Kuzin EXPERIENCE IN THE USE OF THE CURRENT TRANSFORMER AS SENSOR TO COMPENSATE THE SERVOMECHANISM 471
Ю.Р. Кузин ОПЫТ РАЗРАБОТКИ СЛЕДЯЩЕГО ПРИВОДА С ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ КОРРЕКЦИЕЙ НА ОСНОВЕ ТРАНСФОРМАТОРА В КАЧЕСТВЕ ДАТЧИКА ТОКА 471

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

DEVELOPING TECHNOLOGIES OF FINITE-STATE AUTOMATA THEORY APPLICTION FOR MULTY-AGENT ROBOTIC SYSTEMS CONTROL

MIREA, Moscow
cpd@mirea.ru

Development of methods and algorithms for group control is currently among the most important and topical trends in modern robotics.

Research that are actively carried out in this area, both in Russia and abroad, show the broad prospects not only in the using but also in the creation of multi-agent robotic systems (MARS), addressing a wide range of applications in the field of defense, counter-terrorism, industrial production, precision farming, space exploration, etc.

The known examples of MARS organization assume the use of different strategies of centralized and decentralized autonomous robots control in order to ensure their group cooperation.

It is necessary to separately emphasize that despite the variety of proposed approaches to the construction of MARS its functional structure can be reduced to a common form with allocation of the following set of basic subsystems [1, 2]:

- advanced human-machine interface that provides rapid mission statement, a reasonable selection of the required number and type of robots, and also the subsequent monitoring of their functioning;
- subsystem of planning expedient behavior and the coordinated actions of autonomous robotic agents considering the specificity of applied missions, the progress of its implementation and available resources and the subsequent formation (issuance) of relevant tasks;
- subsystem of an environment functioning model automatic generation and analysis based on the complex processing and semantic interpretation of the heterogeneous sensory information received from single robotic agents in the joint group;
- subsystem providing information and logical communication and agents compatibility (both at the level of using common data representation formats, messages, commands and target designation, and at the level of technical transmission channels).

A perspective approach to the problems of autonomous robots group control is associated with the complex use of the automata theory apparatus.

It should be noted that the automata can be considered as a form of knowledge representation, as a specific type of information reflecting a system of concepts classification or causality in some subject area.

Experience has shown that the finite-state machine formalism, which is very convenient for the description of knowledge about the scenarios and the reasonable behavior logic, is extremely interesting in terms of its use analysis of an already known series-parallel scenario for the step-by-step implementation of the considered mission.

The corresponding scenario model is constructed in the form of a network of typical finite-state automata, which relationships structure and meaning reflect the sequence logic and the required technological operations execution stage.

At the same time, identifying operations that available for the execution is performed if the previous ones in the formation of the autonomous robots intelligent control models as well as of multi-agent groups based on them, in accordance with different strategies.

For example, the process of MARS expedient actions planning for a variety of missions (including construction and assembly, precision farming, the search forests fires ignition locations, etc.) is based on the

are complete, thus allowing the tasks formation possibility for intelligent autonomous robots acting as part of a multi-agent system based on centralized control strategy (Fig. 1) [3, 4].

It is important to notice that the use of the finite automata formalism as a constructive basis for building appropriate action planning subsystem for MARS is consistent with the principles of construction of man-machine interface for setting the necessary applied tasks. Their scenario models can be directly specified by the operator in the interactive mode as a graph whose nodes are associated with individual operations or stages, and the arcs define the desired execution order (Fig. 2). Subsequent analysis and interpretation of the

generated graph allows to automatically synthesize the scenario model, which is based on finite automata and provides tasks scheduling within the given applied task for a group of robots [5, 6].

A completely different class of applied tasks is characterized by the absence of a priori defined scenarios for their solution. Such examples are related to the problems of maze exploration that have unknown topology and length with the use of a group of robots, e.g. in the study of catacombs and natural caves (as is was required under anti-terrorist operations in Afghanistan during the search of hideouts of armed groups) or in the task of monitoring of channels of technical communications, pathways and cavities of civil engineering structures (which may significantly diverge in the real configuration from existing plans).

Figure 1 – Modeling action planning and tasks distribution processes in MARS for solving problems of modular constructions assembly

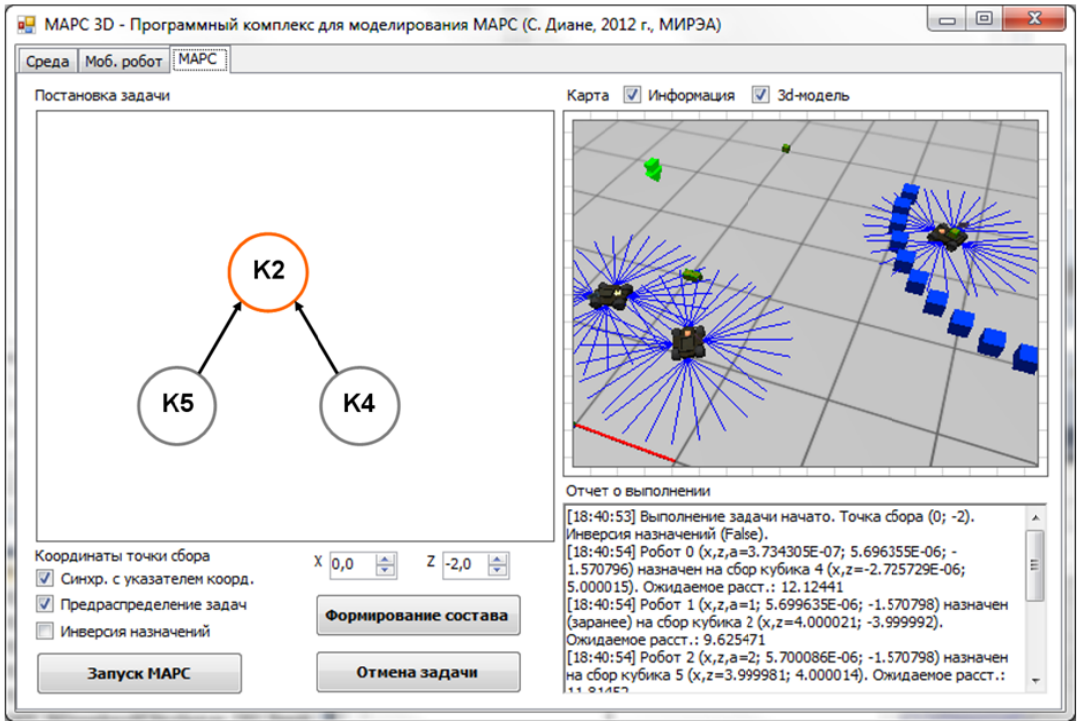


Figure 2 – The use of the man-machine interface for setting an applied task to a group of robots and their operation control during task execution

In these cases, the scenario model for planning of appropriate actions for autonomous robots, which also may be presented as a set of finite automata, can be automatically generated and supplemented during the solving of the task, when the discovery of another fork in the maze generates a set of alternative tasks aimed at

environment control in the outcoming corridors (Fig. 3). Implementation of this approach in combination with a SLAM-technology for local navigation and mapping, resulted in the development of software and algorithmic tools of group control of robots in the MARS for examination of the mazes (Fig. 4) [7].

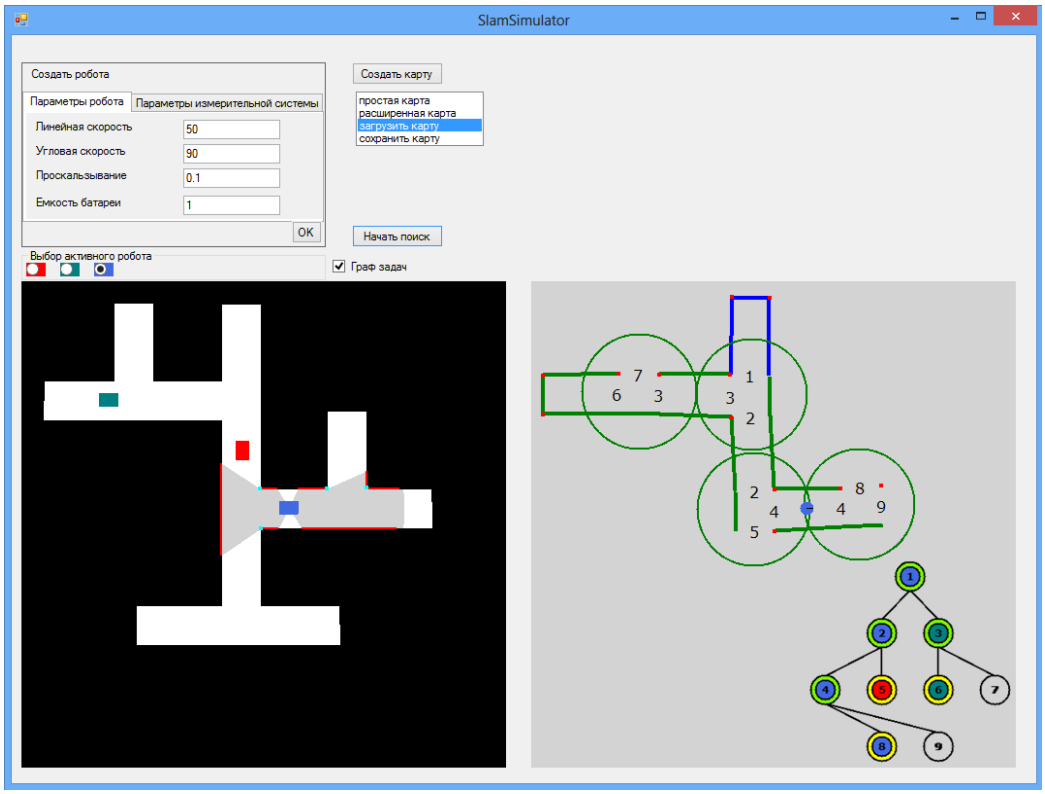


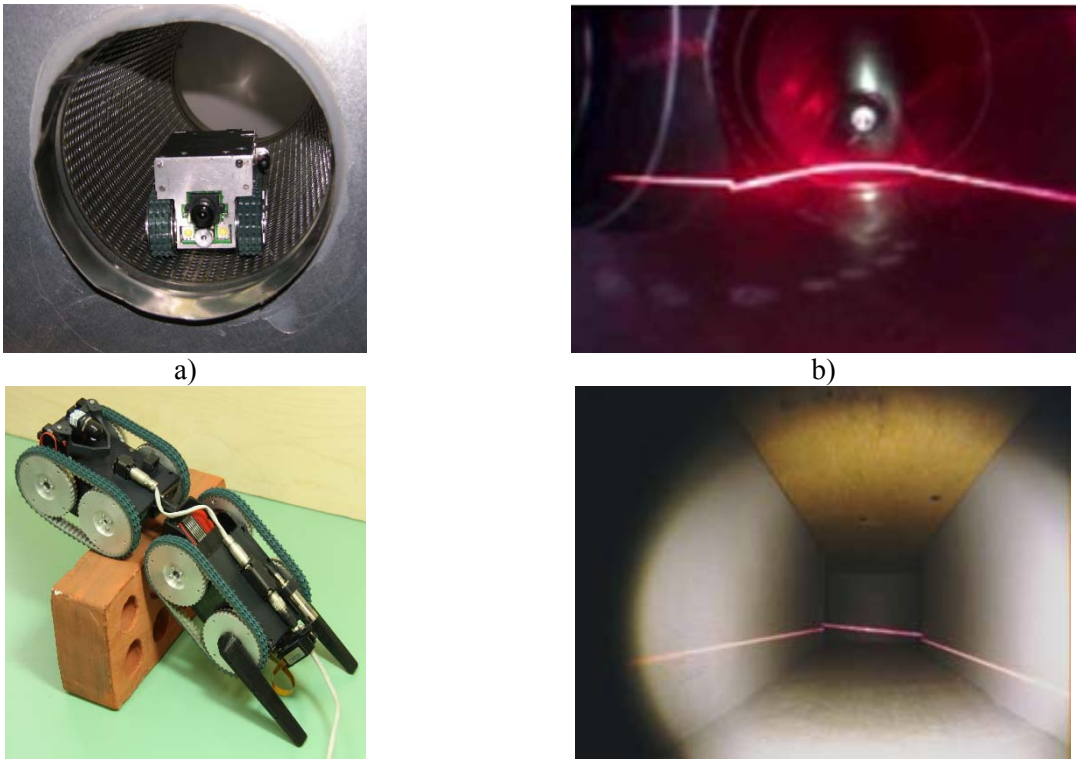
Figure 3 – Modeling of processes of group control of robots during the examination of the maze

A similar situation occurs in the tasks of clearing the devastation in the aftermath of natural and man-made disasters, when the removal of the debris layer allows to reveal the next layer and to determine the plan of further actions to eliminate the blockage, which provides the possibility of automatic formation of appropriate MARS behavior based on finite automata scenarios.

When implementing the centralized MARS management strategies, finite automata are the most convenient means of describing not only for the applied problem being solved, but also for control systems of intelligent robots themselves, ensuring the coordinated solving of the problem.

At the same time, a promising approach to implementation of strategies for decentralized control of autonomous robots constituting the joint group is associated with their description at the level of probabilistic automata. Visible benefits are associated with the possibility of reasonable changes in the probabilities of selection of appropriate actions of one robotic agent depending on the performance of the other. This scheme is of significant importance from the group control point of view, not only in the game of robotic football (competitions for RoboCup prizes are held at the world level), but also in the decision of much more important and urgent tasks, e.g. related to the distribution of targets in the groups of unmanned combat robots carrying out military operations.

One of the most urgent problems of creating autonomous robots and multi-agent robotic systems is to increase the degree of their adaptability to the un-certainty conditions of external environment. Research carried out in this direction, evidently show that the provision of enhanced adaptation capacity for autonomous robots and MARS to a variety of uncertainties can be achieved on the basis of different methods and technologies of self-learning [8, 9].



a) b)

c) d)

Figure 4 – MIREA projects on the creation of robotic systems for inspection of mazes: prototypes of autonomous mobile mini-robots (a), c));
fragments of their field tests (b), d))

In this sense, the use of technology of stochastic and probabilistic automata with a memory provides wide opportunities both for solving learning and knowledge interpretation problems, based on generalization of autonomous robots experience and functioning peculiarities, e.g. received through classification trees methods.

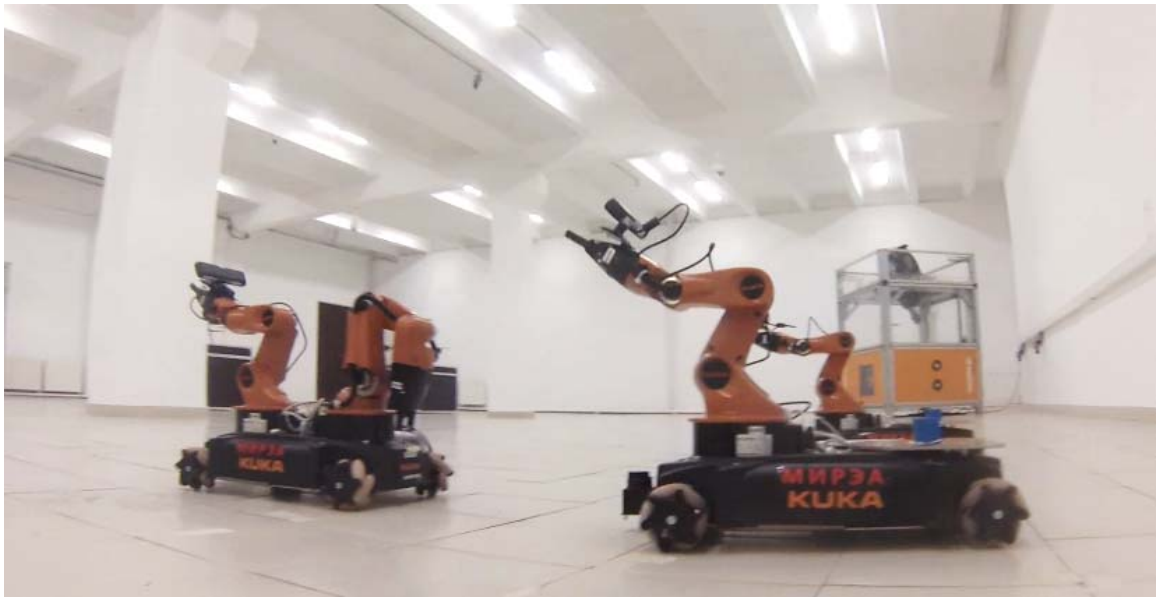


Figure 5 – Full-scale experiments to verify the means and methods of group control of robots on the MIREA testing ground

The results of the complex research conducted at the Department of "Problems of control" at MIREA, confirm the effectiveness of complex application of the finite automata theory to the organization of group control of autonomous robots not only at the level of the model, but also in the field experiments on the MARS (Fig.5) for the solving of various applied tasks.

1. Makarov I.M., Lokhin V.M., Manko S.V., Romanov M.P. From intellectual robots – to multiagent robotic systems / Voennyi parad, №5(101), 2010.
2. Manko S.V., Lokhin V.M., Romanov M.P. Multiagent robotic systems design concept / Vestnik MGTU MIREA, № 3 (8), vol. 1, 2015.
3. Makarov I.M., Lokhin V.M., Manko S.V. et al. Models and algorithms of action planning and task distribution in multiagent robotic systems / Mehatronika, avtomatizatciya, upravlenie №5, 2012.
4. Lokhin V. M., Manko S.V., Pomanov M. P., Diane S. A. K. Ways to represent knowledge in multiagent robotic systems / Mehatronika, avtomatizatciya, upravlenie №1, 2014.
5. Manko S.V., Alexanderova R.I., Diane S. A. K. Man-machine interface for multiagent robotic systems / Izvestiya IUFU. Tekhnicheskie nauki №3, 2014.
6. Manko S.V., Diane S. A. K., Lokhin V. M., Pomanov M. P. Models and software for multiagent robotic systems / Vestnik MGTU MIREA, № 3 (8), vol. 1, 2015.
7. Kucherskiy R.V., Manko S.V. Multiagent robotic system model for cooperative cartography of elongated cavities in engineering constructions / Estestvennye i tekhnicheskie nauki, №6, 2013.
8. Lokhin V.M., Manko S.V., Romanov M.P. Increasing adaptive properties of autonomous robots based on intelligent technologies / Trudy mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentciy «Ekstremalnaia robototekhnika», - Sankt-Peterburg: Izd-vo «Politekhnika servis», 2015.
9. Lokhin V.M., Manko S.V., Alexanderova R.I. i dr. Mechanisms of intelligent feedback in control and information processing systems of autonomous robots and multi-agent robotic groups/ Mehatronika, avtomatizatciya, upravlenie №8. vol. 16. 2015.

В.М. Лохин, С.В. Манько, М.П. Романов

РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИМЕНЕНИЯ АППАРАТА ТЕОРИИ АВТОМАТОВ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ МНОГОАГЕНТНЫМИ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ

Московский технологический университет (МИРЭА), Москва
cpd@mirea.ru

Разработка методов и алгоритмов группового управления в настоящее время относится к числу наиболее важных и актуальных направлений в современной робототехнике.

Исследования, которые активно проводятся в этой области как в России, так и за рубежом, убедительно свидетельствуют о перспективах не только применения, но и создания многоагентных робототехнических систем (МАРС), ориентированных на решение широкого круга прикладных задач в оборонной сфере, противодействия терроризму, промышленного производства, высокоточного земледелия, освоения космического пространства и т.д.

Известные варианты организации МАРС предполагают использование различных стратегий централизованного и децентрализованного управления автономными роботами в целях обеспечения их взаимодействий при совместном функционировании в составе объединенной группировки. Необходимо отдельно подчеркнуть, что при всем многообразии предлагаемых подходов к построению МАРС ее функциональную структуру удается привести к общему виду с выделением следующего набора основных подсистем [1, 2]:

- развитого человеко-машинного интерфейса, позволяющего обеспечить оперативную постановку решаемой прикладной задачи, обоснованный выбор необходимого числа и типа роботов, а также последующий контроль их функционирования;
- планирования целесообразного поведения и координированных действий автономных робототехнических агентов с учетом специфики поставленной прикладной задачи, хода ее выполнения и имеющихся ресурсов с последующим формированием и выдачей соответствующих заданий;
- автоматического формирования и анализа модели среды функционирования на основе комплексной обработки и смысловой интерпретации разнородной сенсорной информации, поступающей от отдельных робототехнических агентов объединенной группировки;
- обеспечения информационно-логического взаимодействия и совместимости агентов (как на уровне использования единых форматов представления данных, сообщений, команд и целеуказаний, так и на уровне технических каналов их передачи).

Перспективный подход к решению задач группового управления автономными роботами связан с комплексным применением аппарата теории автоматов.

Следует отметить, что автоматы могут рассматриваться в качестве одной из форм представления знаний, как специфического вида информации, отражающей систему классификационных понятий или причинно следственных связей в какой-либо предметной области.

Как показывает опыт, формализм конечных автоматов, которыйявляется крайне удобным для описания знаний о сценариях и логике целесообразного поведения, представляет крайний интерес с точки зрения своего использования при формирования моделей интеллектуального управления автономными роботами и многоагентными группировками на их основе в соответствии с различными стратегиями.

Так, например, планирование целесообразных действий МАРС для целого ряда приложений (включая строительно-монтажные работы, высокоточное земледелие, поиск очагов возгорания лесных угодий и т.д.) осуществляется на основе анализа заранее известного последовательно- параллельного сценария поэтапной реализации рассматриваемой 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, обеспечивая возможность формирования заданий для интеллектуальных автономных роботов, действующих в составе многоагентной системы на основе использования централизованной стратегии управления (Рис. 1) [3, 4].

Крайне важно, что использование формализма конечных автоматов в качестве конструктивной базы для построения подсистемы планирования целесообразных действий МАРС хорошо согласуется с принципами построения средств человеко-машинного интерфейса для постановки необходимых прикладных задач. Их сценарные модели могут задаваться оператором в интерактивном режиме непосредственно в виде графа, узлы которого ставятся в соответствие отдельным операциям или этапам, а дуги определяют требуемый порядок их следования (Рис. 2). Последующий анализ и интерпретация сформированного графа позволяет автоматически синтезировать сценарную модель, которая строится на базе конечных автоматов и обеспечивает планирование заданий по выполнению поставленной прикладной задачи группой роботов [5, 6].

Рисунок 1 – Моделирование процессов планирования действий и распределения заданий в составе МАРС при решении задачсборки инженерных конструкций модульного типа

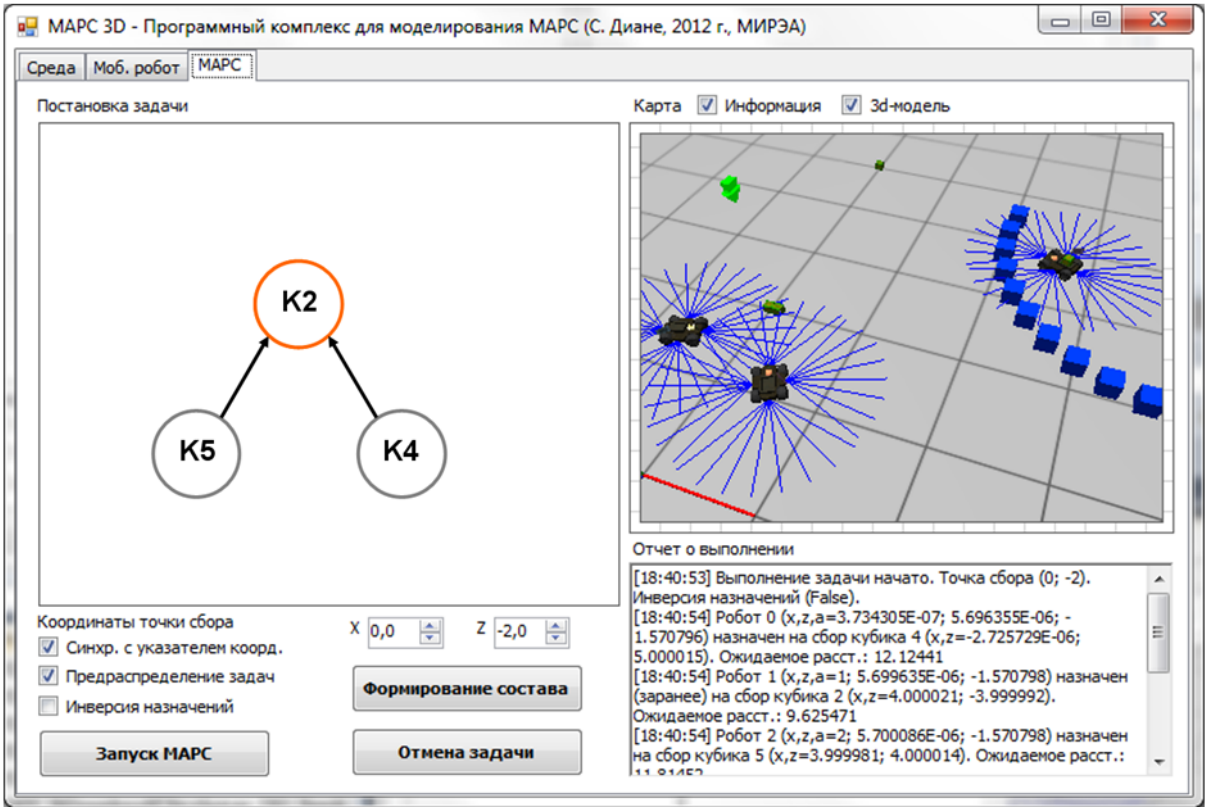


Рисунок 2 – Использование средств человеко-машинного интерфейса для постановки прикладной задачи группе роботов и контроля их функционирования в ходе ее выполнения

Совершенно иной класс прикладных задач характеризуется отсутствием априорно заданных сценариев своего решения. Подобные примеры связаны с обходом лабиринтов неизвестной топологии и протяженности с использованием группы роботов при исследовании катакомб и естественных пещер (как это требовалось в рамках антитеррористической деятельности в Афганистане при поиске укрытий бандформирований), мониторинге каналов технических коммуникаций, путепроводов и полостей инженерно-строительных конструкций (реальная конфигурация которых может существенно расходиться с имеющимися планами).

В этих случаях сценарная модель для планирования целесообразных действий автономных роботов, которая также представляется в виде совокупности конечных автоматов, может автоматически формироваться и дополняться по ходу решения поставленной задачи, когда обнаружение очередной развилки лабиринта порождает набор альтернативных заданий по контролю обстановки в исходящих из нее коридоров (Рис. 3). Реализация такого подхода в сочетании со SLAM-технологией локальной навигации и картографирования, позволила обеспечить создание программно-алгоритмических средств группового управления роботами в составе МАРС для обследования лабиринтов (Рис. 4) [7].

Аналогичная ситуация возникает в задачах расчистки разрушений при ликвидации последствий природных и техногенных катастроф, когда удаление очередного слоя завала позволяет вскрыть последующий пласт и определить план действий по его разбору, что обусловливает возможность автоматического формирования сценариев целесообразного поведения МАРС на основе применения технологии конечных автоматов.

При реализации стратегий централизованного управления МАРС конечные автоматы выступают удобным средством описания не только решаемой прикладной задачи, но и систем управления самих интеллектуальных роботов, обеспечивающих ее совместное выполнение [3].

В то же время, перспективный подход к реализации стратегий децентрализованного управления автономными роботами в составе объединенной группировки связан с их описанием на уровне вероятностных автоматов. Видимые преимущества связаны с возможностью обоснованного изменения вероятностей выбора целесообразных действий одного робототехнического агента в зависимости от результатов функционирования другого. Такая схема представляет очевидный интерес с точки зрения группового управления роботами не только при игре в футбол (соревнования по которому на призы RoboCup проводятся на мировом уровне), но и при решении гораздо более важных и актуальных

задач,связанных, например, с распределением целей при использовании безэкипажных средств боевой робототехники при ведении военных операций.

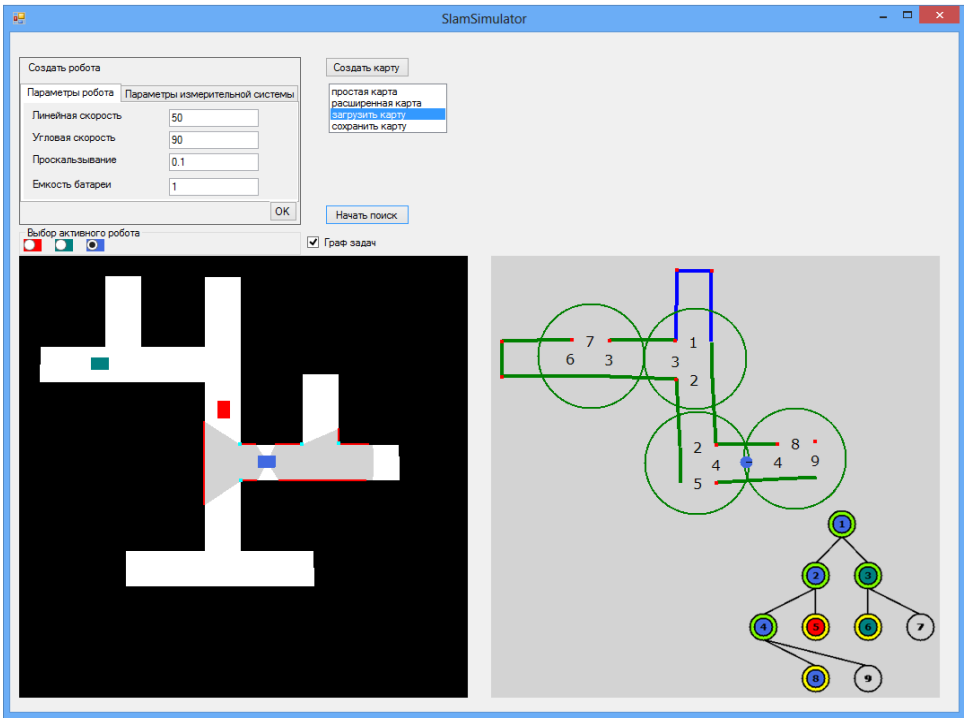
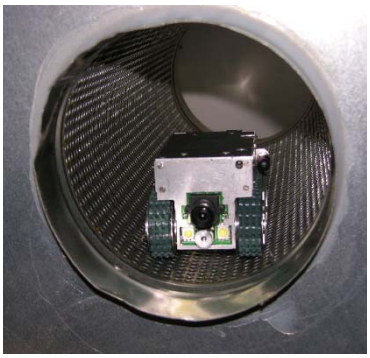
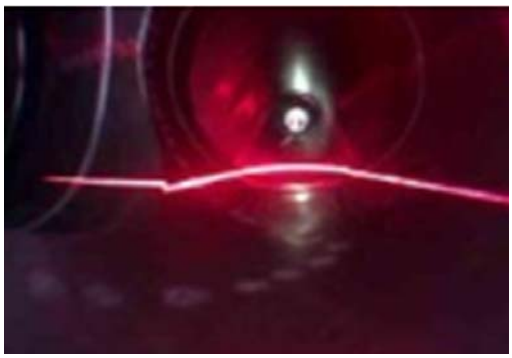


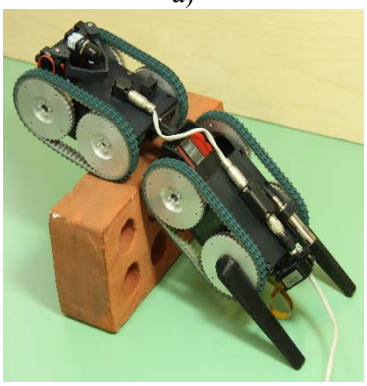
Рисунок 3 – Моделирование процессов группового управления роботами при обследовании лабиринта



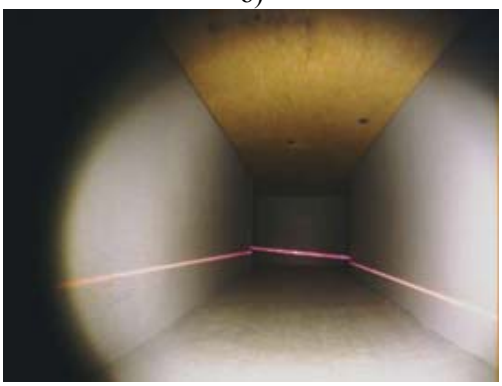
а)



б)



в)



г)

Рисунок 4 – Разработки МИРЭА по созданию робототехнических систем для обследования лабиринтов: опытные образцы автономных мобильных мини-роботов (а), в)); фрагменты их натурных испытаний (б), г))

Одна из наиболее острых проблем создания автономных роботов и многоагентных робототехнических систем связана с повышением степени их адаптивности к условиям внешней

среды. Исследования, проводимые в этом направлении, убедительно свидетельствуют, что обеспечение расширенных способностей по адаптации автономных роботов и МАРС к многообразию факторов неопределенности может достигаться на основе различных методов технологий самообучения [8, 9].

В этом смысле применение технологии стохастических и вероятностных автоматов с памятью представляет широкие возможностикак собственно для решения задач самообучения, так и для интерпретации знаний, обобщающих опыт и особенности функционирования автономных роботов и получаемых с помощью, например, методов деревьев классификации.

Результаты комплексных исследований, проводимых на кафедре «Проблемы управления» МИРЭА, подтверждают эффективность комплексного применения аппарата теории автоматов к организации группового управления автономными роботами на уровне не только модельных, на и натурных экспериментов по использованию МАРС (Рис. 5) для решения различных прикладных задач.

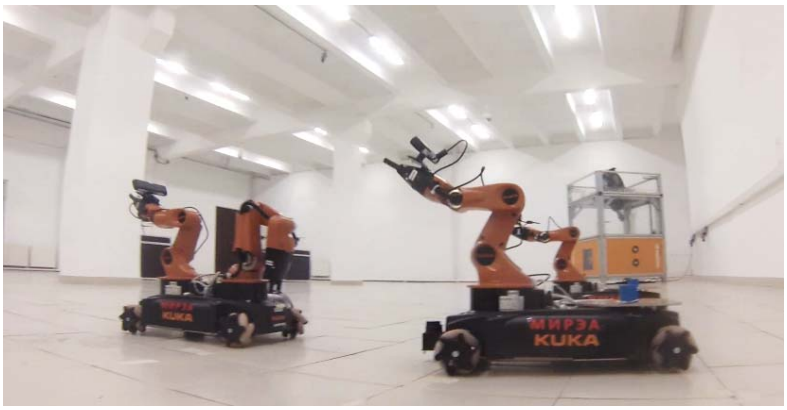


Рисунок 5 – Натурные эксперименты по отработке средств и методов группового управления роботами на полигоне МИРЭА

Доклад подготовлен в рамках гранта РФФИ №16-29-04379.

1. Макаров И.М., Лохин В.М., Манько С.В., Романов М.П. От интеллектуальных роботов – к мультиагентным робототехническим системам // Военный парад, №5(101), 2010.
2. Манько С.В., Лохин В.М., Романов М.П. Концепция построения мультиагентных робототехнических систем / Вестник МГТУ МИРЭА, № 3 (8), т. 1, 2015.
3. Макаров И.М., Лохин В.М., Манько С.В. и др. Модели и алгоритмы планирования действий и распределения заданий в мультиагентных робототехнических системах / Мехатроника, автоматизация, управление №5, 2012.
4. Лохин В.М., Манько С.В., Романов М.П., Диане С.А.К. Способы представления знаний и особенности функционирования мультиагентных робототехнических систем / Мехатроника, автоматизация, управление №1, 2014.
5. Манько С.В., Александрова Р.И., Диане С. А. К. Человеко-машинный интерфейс для мультиагентныых робототехнических систем / Известия ЮФУ. Технические науки №3, 2014.
6. Манько С.В., Диане С.А.К., Лохин В.М., Романов М.П. Модели и программно-алгоритмическое обеспечение мультиагентных робототехнических систем / Вестник МГТУ МИРЭА, № 3 (8), т. 1, 2015.
7. Кучерский Р.В., Манько С.В. Модель многоагентной робототехнической системы для кооперативного картографирования протяженных участков полостей строительных конструкций / Естественные и технические науки, №6, 2013.
8. Лохин В.М., Манько С.В., Романов М.П. Повышение адаптивных свойств автономных роботов на базе интеллектуальных технологий / Труды международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника», - Санкт-Петербург: Изд-во «Политехника сервис», 2015.
9. Лохин В.М., Манько С.В., Александрова Р.И. и др. Механизмы интеллектуальных обратных связей, обработки знаний и самообучения в системах управления автономными роботами и мультиагентными робототехническими группировками / Мехатроника, автоматизация, управление №8. Том 16. 2015.

V.G.Gradetsky[1], I.L. Ermolov[2], M.M. Knyazkov[1], E.A. Semyonov[1], S.A. Sobolnikov[2], A.N. Sukhanov[1]

SCIENTIFIC TASKS OF IMPLEMENTING TRANSPORTATION TASKS BY GROUPS OF UGVS

[1]Institute for Problems in Mechanics of RAS;[2]MSTU «STANKIN», Moscow
ermolov@ipmnet.ru

Abstract

This paper is studying state of the art of UGVs completing transportation task. It presents some interesting examples of such usage. Also some scientific results of research are presented. Final part of the paper is devoted to further tasks of scientific research of this application of UGVs.

Keywords: UGV, multiple robot control, multiple UGVs application, transportation task.

В.Г. Градецкий[1], И.Л. Ермолов[2], М.М. Князьков[1], Е.А. Семенов[1], С.А. Собольников[2], А.Н. Суханов[1]

О НАУЧНЫХ ЗАДАЧАХ ВЫПОЛНЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ ОПЕРАЦИЙ ГРУППОЙ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ

[1]Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН (ИПМех РАН);
[2]МГТУ «СТАНКИН», Москва
ermolov@ipmnet.ru

Аннотация

Статья посвящена изучению опыта выполнения транспортной задачи группой мобильных роботов. В работе приведены примеры применения наземных роботов, выполняющих единую транспортную задачу, рассмотрены основные направления научных исследований в данной области. В заключительной части статьи формулируются направления перспективных исследований данного направления.

Ключевые слова: мобильный робот, групповое управление, групповое применение, транспортная задача.

1. Актуальность группового выполнения транспортной операции мобильными роботами.

Актуальность использования робототехнических систем в различных областях человеческой жизни очевидна. Роботы используются в первую очередь там, где возможности человека ограничены или не эффективны. Низкая эффективность ручного труда человека по сравнению с роботами, в первую очередь, проявляется, когда идет речь о повторяющихся многократно технологических операциях. Человеку сложно, а, чаще всего невозможно, добиться той производительности, которую показывают современные робототехнические системы. Особую роль получает применение роботов в оборонной области и для обеспечения безопасности граждан [5].

В настоящее время, пользователи мобильных роботов переходят от практики отдельного, "разового" применения роботов к попыткам применения роботов в группах, формируя системный принцип. Однако более активное развитие практики группового применения роботов сдерживается низким уровнем автономности роботов [4].

При формировании потребностей группового применения роботов следует определить, для каких именно применений эффективно применять роботы в группах. Например, проводятся исследования по применению групп мобильных роботов в военной и гражданской сферах в области коммуникаций [3] и других.

Одним из таких применений является выполнение группой роботов единой транспортной задачи. Под этим термином, в данной работе, понимается целевое перемещение объекта группой роботов, функционирующих для этого в скоординированном режиме взаимодействия. Преимуществом использования групп роботов является расширение набора выполняемых функций, за счет установки на каждый робот индивидуальных исполнительных устройств. Важнейшим достижением будет являться унификация транспортных роботов при разнообразии транспортируемых грузов. Еще одним преимуществом будет более высокая вероятность выполнения задания, которая достигается за счет возможности перераспределения целей между роботами группы в случае выхода из строя некоторых из них. Чтобы достичь поставленной цели, группа роботов должна функционировать так, чтобы действия каждого отдельного робота были направлены на получение наибольшего группового эффекта.

Применением группы роботов, выполняющих единую транспортную задачу, занимаются в различных научно-исследовательских центрах мира. В развитие этих работ пришло решение

применять сразу несколько роботов, объединённых общей целью, при выполнении сложных задач [8-12].

В работе, посвященной автономной роботизированной системе перемещения автомобилей [13], представлены результаты использования роботов объединенных в группу для автономного поиска и транспортировки транспортных средств за счет поднятия машины за колеса (Рис.1).

Разработанный прототип (AVERT) способен перемещать транспортные средства с различными скоростями и в любом направлении. Роботы оснащены омниколесами, что позволяет им двигаться в любом направлении, фиксировать каждое колесо транспортного средства и синхронизировано осуществлять подъем автомобиля за счет бортовых катков.

Общая система управления принимает решение о возможных траекториях перемещения, встроенные в каждый робот сенсоры обнаруживают возможные препятствия и корректируют траекторию перемещения в автоматическом режиме.

Рисунок 1 – Роботизированная система AVERT

В исследованиях коллектива авторов Национального технического университета города Афины, Греция [14] описана система двух неголономных колесных роботов перемещающих один объект с общей координацией (Рис.2).

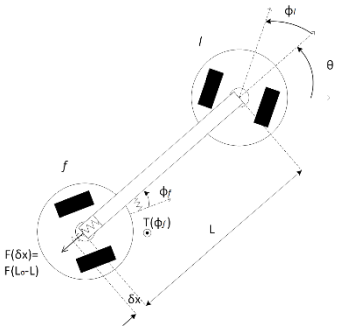


Рисунок 2 – Схема перемещения двух неголономных колесных роботов перемещающих один объект

Будем считать, что оба показанных на рис 2 робота являются неголономными системами с двумя ведущими колесами каждая. Полагая, что движение происходит в горизонтальной плоскости, математическая модель этой системы будет выражаться следующим образом:

$$\begin{bmatrix}\dot{x}_i\\ \dot{y}_i\\ \dot{\theta}_i\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}\cos\theta_i\\ \sin\theta_i\\ 0\end{bmatrix} u_i + \begin{bmatrix}0\\0\\1\end{bmatrix} r_i, i \in \{l, f\} \quad (1)$$

Где x_i, y_i, θ_i – координаты и ориентация роботов в пространстве, относительно начала локальных систем координат ведущего l и ведомого f роботов. Сигналы u_i, r_i – задающие скорости. L – расстояние между двумя роботами, не являющееся постоянным значением ввиду нежесткой сцепки между роботами.

Схема реализована за счет повторения ведомым роботом всех действий ведущего робота, при этом они имеют общую связь в виде перемещаемого объекта. Информацией о конечной конфигурации объекта обладает только ведущий робот. Ведомый робот измеряет и корректирует свой крутящий момент, чтобы сохранить сцепку с ведущим роботом, синхронизировать положение и выровнять скорость относительно перемещаемого объекта. Роботы не обмениваются информацией между собой,

что усложняет управление всей системы. Подобная схема рассматривается для случая перемещения объекта парой роботизированных платформ. Научный коллектив Брюсельского Свободного Университета [15] исследовал возможность перемещения группой роботов тяжелого объекта к спорадически меняющемуся целевому местоположению (Рис. 3).

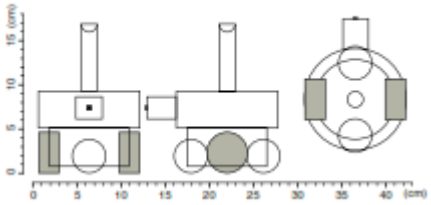


Рисунок 3 – Моделирование перемещения объекта группой роботов

Рассматривается ситуация, когда некоторые роботы могут самостоятельно локализовать цель и организовать совместную работу с роботами, которые не в состоянии определить цель. Дальнейшая реализация перемещения организуется за счет совместного толкания или подтягивания объекта перемещения. Проблемы, возникающие в данной задаче, связаны, преимущественно, с оценкой массы объекта. При превышении допустимой для перемещения роботом массы объекта робот должен сообщить о необходимом содействии ещё одной роботизированной платформе и повторять это действие до тех пор, пока объект не будет сдвинут с места. При этом также необходимо учитывать геометрию контактной области на объекте.

2. Направления исследований в групповом выполнении транспортной операции.

В результате анализа доступных источников информации и последующей классификации можно выделить следующие основные направления научных исследований, проводимых для обеспечения группового выполнения транспортных задач:

Решение задач перемещения объектов большой протяженности несколькими роботами с шасси на колесном ходу посредством роликовых платформ, установленных на корпусах роботов, применяя тактику перехода роботов из первых рядов в последние по мере перемещения груза. В этом случае используется биомеханический способ транспортирования протяженных грузов на корпусах или плечах биосистем, например муравьев.

Важным аспектом использований считается анализ рациональных областей применения нагруженных роботов и тот социально-экономический эффект, который может быть достигнут (транспортировка деревьев на лесоповале, разбор завалов при катастрофах техногенных и естественных, строительство объектов, в том числе мостов, переправ, заграждений).

Разработка прикладных проблем, повышающих проходимость, маневренность, надежность, быстродействие, устойчивость движения. Одно из возможных решений – применение независимой подвески с автономным приводом на каждом колесе, организация комбинированного шагового и колесного движения (шаговое колесо).

Разработка методов и алгоритмов управления группового взаимодействия роботов, выполняющих совместную операцию по транспортировке грузов при последовательном соединении роботов в режимах толкания грузов, тянущих грузы, выполнения поворотов, разворотов на пересеченной местности с различным качеством грунтов.

Разработка методов и алгоритмов адаптивного управления нагруженного робота и группы транспортных нагруженных роботов в условиях динамически изменяющейся внешней среды.

В статье [6] рассматривается задача передвижения группой мобильных роботов твердого круглого тела по горизонтальной поверхности из исходной точки в заданную при отсутствии препятствий. Коллектив роботов представляет собой гомогенную группу из произвольного числа роботов, каждый робот жестко сцепляется с грузом, при этом описывается двухмерный случай. Фокус работы направлен на методы самоорганизации и распределения задач между роботами группы.

В [7] описывается способ переноса твердого тела группой из двух роботов. При этом рассматривается возможность действия в недетерминированной среде с наличием как стационарных, так и динамических препятствий. Архитектура системы содержит лидера, который своим движением задает направление к целевой точке, и ведомого робота, который отвечает за поддержание необходимого расстояния между двумя роботами. Груз соединен с роботами шарниром.

Работа [8] посвящена вопросу о совместном переносе груза группой квадрокоптеров, при этом груз подвешен к ним на тросе. В статье рассмотрена динамическая модель такой системы с грузом,

представляющим собой твердое тело. Показан способ формирования динамически возможных траекторий для перемещения груза. Проведено сравнение с квазистационарной моделью. Возможность обхода препятствий в статье не рассматривается.

В статье [17] представлен метод управления модульной системой, состоящей из мобильных роботов и общей нагрузки. Каждый робот представляет собой колесную платформу с двухстепенным манипулятором. Описан метод управления и планирования действий, учитывающий кинематические (голономные и не голономные) связи модели системы. Представлены два варианта архитектуры управления лидер – ведомый и децентрализованный. Возможность обхода препятствий также не рассматривается.

Одной из наиболее сложных задач в групповом управлении роботами является обеспечение коммуникации. Поэтому актуальными направлением является обеспечение координации группы роботов без непосредственного коммуникационного соединения. Такой подход при решении транспортной задачи рассмотрен в работе [18]. В группе роботов присутствует лидер, который направляет груз в заданную точку. Ведомые роботы способны измерять направление перемещения груза. Определив направление, они посредством собственной тяги начинают передвигать груз в направлении, заданном лидером. При этом не рассматривается важный вопрос вращения груза. Интересно отметить, что в качестве лидера может также выступать и человек.

В рассмотренных выше примерах груз, представлен твердым телом, однако на практике часто приходится решать задачу транспортировки деформируемых (мягких) объектов. Статья [19] посвящена решению такой задачи с помощью группы колесных роботов с манипуляторами. Рассмотрены вариант как централизованного, так и децентрализованного управления. Представленный в статье алгоритм обеспечивает обход стационарных и динамических препятствий во время переноса объекта и, одновременно, сохранение необходимой его формы. Динамика робота не учитывается, рассматривается только кинематическая модель. Модель деформируемого объекта представлена реконфигурируемым многоугольником. Экспериментальные исследования проводились на роботах типа Kuku Youbot.

3. Перспективы исследований группового выполнения транспортной операции.

К таким проблемам можно отнести учет геометрических и инерционных параметров объекта транспортировки, учёт проскальзывания объекта при нежёсткой сцепке с роботизированной платформой, учет неровностей местности при необходимости, соблюдения определенной ориентации объекта в пространстве, а также учет взаимодействия типа грунта и устройства контакта с поверхностью. Данные подзадачи решались в рамках различных исследований в течение последних 15 лет [1].

В работах ранее рассмотренных исследователей описываются преимущественно системы, состоящие из двух роботов. Однако, в задачах перемещения объекта большим количеством роботизированных платформ необходимо учитывать геометрический центр объекта для расчета скорости вращения колес различных платформ для предотвращения проскальзывания при поворотах. Помимо этого необходимо учитывать неопределенность среды и многообразие параметров грунта для предотвращения проскальзывания и снижения погрешности позиционирования. Начиная с 2000 года исследованиями этой задачи занимались при создании проекта Omnimate [16]. В данном проекте была реализована система коррекции погрешности позиционирования колеса при проскальзывании (IPEC). Однако данная система была реализована преимущественно для плоских поверхностей.

На рисунке 4 представлена предлагаемая схема организации работы по перемещению объекта - 1 в недетерминированной среде. В исследовании за основу будет приниматься кинематическая модель четырехколесной роботизированной транспортной платформы - 2, оснащенной платформой Гью-Стюарта - 3 с интегрированными датчиками силомоментного воздействия - 4 для оценки параметров взаимодействия объекта с роботизированной платформой во время перемещения.

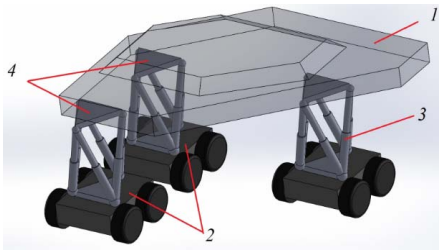


Рисунок 4 – Предлагаемая схема решения транспортной задачи

В рамках данного исследования был поставлен ряд задач, среди которых можно выделить следующие: построение функциональной схемы взаимодействия роботов друг с другом и с объектом; построение кинематической схемы группы роботов с учётом габаритных параметров объекта и возможностью включения в эту схему новых агентов или исключения агентов из неё; разработка системы управления движением роботов с учётом информации о взаимодействии колёс с грунтом и системы управления платформами Гью-Стюарта с учётом требований к ориентации объекта в пространстве при перемещении.

Также считаются перспективными следующие направления исследований:

Разработка механической и математической моделей взаимодействия нескольких мобильных роботов на колёсном ходу, вытаскивающих из завала с помощью тяг, расположенных между собой под различными углами, объект с учетом и без учета проскальзывания колес о грунт.

Роботы с ограниченной мощностью, коэффициенты сцепления колес с грунтами переменные в зависимости от свойств грунта, числа роботов от двух и более.

Работа над данным материалом поддержана финансированием РФФИ проектом № 16-29-04199 "Координированное управление группой мобильных роботов, выполняющих единую транспортную задачу".

1. L.E. Parker. Current state of the art in distributed autonomous mobile robotics. In Distributed Autonomous Robotic System 4, pages 3–12. Springer, Tokyo, Japan, 2000.
2. Робототехника Текст.: монография /Ю.Д.Андрианов [и др.]; под ред. Е.П. Попова, Е.И. Юревича.-М.: Машиностроение, 1984.-288 с.
3. Ermolov Ivan, Gradetsky Valery, Knyazkov Maxim, Sobolnikov Sergey, Cooperative Motion Planning of Autonomous UGVs for Mobile Reconfigurable Communcation Networks, Proc. of IEEE-RAS-IARP Joint Workshop on Technical Challenges for Dependable Robots in Human Environment, IROS2013 WS, 3rd. November 2013, Tokyo Big Sight, Japan.
4. Ермолов И.Л., О факторах, влияющих на уровень автономности в пространстве транспортных шасси наземных мобильных роботов, Вестник ЮФУ, №1, 2016.
5. Рубцов И.В. Современная зарубежная военная микро- и мини-робототехника Текст. / И.В.Рубцов, В.Е.Нестеров, В.И Рубцов // Микросистемная техника.- 2000.-№1.-С.36-42.
6. Каляев И.А., Капустян С.Г., Гайдук А.Р. Самоорганизующиеся распределенные системы управления группами интеллектуальных роботов, построенные на основе сетевой модели. Управление большими системами. 30.1. 2010.
7. Machado T., Malheiro T., Monteiro S., Erlhagen W., Bicho E. Multi-constrained joint transportation tasks by teams of autonomous mobile robots using a dynamical systems approach. International Conference on Robotics and Automation (ICRA) Stockholm, Sweden, 2016.
8. Sreenath K., Kumar V. Dynamics, control and planning for cooperative manipulation of payloads suspended by cables from multiple quadrotor robots. In Robotics: Science and Systems (RSS), 2013.
9. Brumitt B.L., Stentz A. GRAMMAPS: A Generalized Mission Planner for Multiple Robots in Unstructured Environments. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation. May 16-20, 1998, Leuven, Belgium, Vol.2, p. 1564-1571.
10. Каляев А.В. Децентрализованная система планирования и управления коллективом транспортных роботов Текст. / А.В. Каляев, И.А. Каляев //Проблемы нейрокибернетики: сб. трудов науч. конф.- Ростов-на-Дону: изд-во РГУ, 1983г.- С. 128-129.
11. Каляев И.А. Децентрализованная система планирования и управления коллективом транспортных роботов Текст. / Каляев И.А. //Кибернетика.-1985.-№4.-С.93-97.
12. H. Yamaguchi. A Cooperative Hunting Behavior by Mobile Robot Troops. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation. May 16-20, 1998, Leuven, Belgium, Vol.4, p. 3204-3209.
13. Angelos Amanatiadis, Christopher Henschel, Bernd Birkicht, Benjamin Andel,Konstantinos Charalampous, Ioannis Kostavelis, Richard May, and Antonios Gasteratos AVERT: An Autonomous Multi-Robot System for Vehicle Extractionand Transportation// 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 26-30 May 2015, pp. 1662 – 1669.
14. Anastasios Tsiamis, Charalampos P. Bechlioulis, George C. Karras and Kostas J. Kyriakopoulos Decentralized Object Transportation by two Nonholonomic Mobile Robots Exploiting only Implicit Communication// 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 26-30 May 2015, pp. 171 – 176.

15. Roderich Gro ß and Marco Dorigo Group Transport of an Object to a Target That Only Some Group Members May Sense// 8th International Conference, Birmingham, UK, September 18-22, 2004. Proceedings,Parallel Problem Solving from Nature - PPSN VIIIVolume 3242 of the series Lecture Notes in Computer Science pp 852-861.
16. Borenstein, J. 2000. The Omnimate: A guidewire- and beacon-free AGV for highly reconfigurable applications. Intern. J. of Production Research, 38(9):1993–2010.
17. M. Abou-Samah M. Tang C. P., Bhatt R. M., Krovi V. A kinematically compatible framework for cooperative payload transport by nonholonomic mobile manipulators. Autonomous Robots. Volume 21, Issue 3, pp 227-242. 2006
18. Wang Z., Schwager M. Kinematic Multi-Robot Manipulation with no Communication Using Force Feedback. International Conference on Robotics and Automation (ICRA) Stockholm, Sweden, 2016
19. Alonso-Mora J., Knepper R., Siegwart R., Daniela R. Local Motion Planning for Collaborative Multi-Robot Manipulation of Deformable Objects. International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Washington State Convention Center Seattle, Washington, 2015.

R.A. Afanasiev[1], I.L. Ermolov[2]

FUTURE OF ROBOTS FOR PRECISION AGRICULTURE

[1]State Research Institute for Agrochemistry, Moscow
rafail-afanasev@mail.ru
[2]Institute for Problems in Mechanics of RAS, MSTU STANKIN, Moscow
ermolov@ipmnet.ru

Abstract

This paper is devoted to usage of robots in agricultural production with emphasis to precision agriculture. It discusses various components of this technology, some results in Russian precision agriculture application and its effectiveness in various cases.

Keywords: robot, agricultural production, precision agriculture.

Р.А. Афанасьев[1], И.Л. Ермолов[2]

О ПЕРСПЕКТИВАХ РОБОТИЗАЦИИ ТОЧНОГО ЗЕМЛЕДЕЛИЯ

[1]ВНИИ агрохимии им. Д.Н. Прянишникова, Москва
rafail-afanasev@mail.ru
[2]ИПМех им. А.Ю.Ишлинского РАН, МГТУ «СТАНКИН», Москва
ermolov@ipmnet.ru

Аннотация

Статья посвящена применению роботов в сельском хозяйстве применительно к технологии точного земледелия. Сформулированы различные компоненты данной технологии. Рассмотрены полученные результаты в отечественном земледелии, обсуждена эффективность данных технологий.

Ключевые слова: роботы, сельскохозяйственное производство, точное земледеление.

В сравнительно недавней истории как отечественного, так и мирового земледелия наблюдался переход от конной тяги к тракторной, далее к более полной механизации и автоматизации производственных процессов. Перспективной тенденцией современного земледелия является переход на технологии возделывания сельскохозяйственных культур с использованием роботизированных сельскохозяйственных машин и комплексов [1-4]. При роботизации сельскохозяйственного производства в наиболее ощутимом, явном проявлении роботизация присуща так называемому точному земледелию (PrecisionAgriculture), отличительной чертой которого служит проведение технологических операций с учётом внутрипольной неоднородности (вариабельности, пестроты) почвенного покрова, его плодородия. Если в традиционном земледелии все технологические приемы, в том числе внесение удобрений и других агрохимических средств, выполнялись единообразно для всего поля (обрабатываемого участка), то в точном земледелии делается упор на корректировку различных агроприемов в зависимости от особенностей плодородия отдельных участков поля (агроконтуров). Актуальность данного направления подтверждается словами основоположника отечественной агрохимии академика Д.Н. Прянишникова, сказанные им в середине XX века и имеющие непосредственное

отношение к теме настоящей статьи: «Определение содержания в почвах подвижных форм азота, фосфора и калия может быть использовано для дифференцировки доз и соотношений азотистых, фосфорнокислых и калийных удобрений, вносимых под одну и ту же культуру, в одном и том же поле севооборота, но на участках поля, различающихся по почвенным условиям… Отсюда большое значение приобретают разнообразные способы учета этих изменяющихся во времени и пространстве свойств почвы в целях наиболее эффективного применения удобрений» [5].

По существующим методикам удобрения вносятся соответственно усреднённым показателям плодородия почвы на всем поле севооборота. Однако исследования показали, что варьирование агрохимического состава почв внутри одно и того же поля очень значительно. Отличия показателя плодородия почвы в различных частях поля могут достигать 300%. На рис. 1 представлен пример карты плодородия почв опытного участка. При внесении на поле усредненных доз удобрений часть почв недополучает требуемые удобрения, а другая часть переудобряется. Это влияет на урожайность (до 150%) и экологичность выращиваемых продуктов.

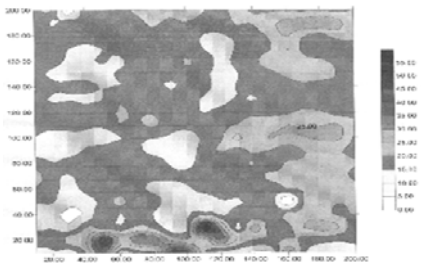


Рисунок 1 – Пример карты плодородности опытного участка

Учесть разнообразие внутрипольных агроконтуров при использовании традиционных методов обследования и картографирования полей, расчета доз удобрений и их внесения, определения норм высева семян, проведении других операций для каждого выделенного агроконтура практически невозможно. Поэтому требуется роботизация всего комплекса работ от агромониторинга до уборки урожая. Во многих странах, в том числе и в России, в этом направлении с последних десятилетий прошлого столетия по настоящее время ведется активный поиск решения проблем точного земледелия.

В настоящее время можно выделить следующие научные и технические задачи, которые необходимо решить для применения роботов в технологии точного земледелия (рис. 2).

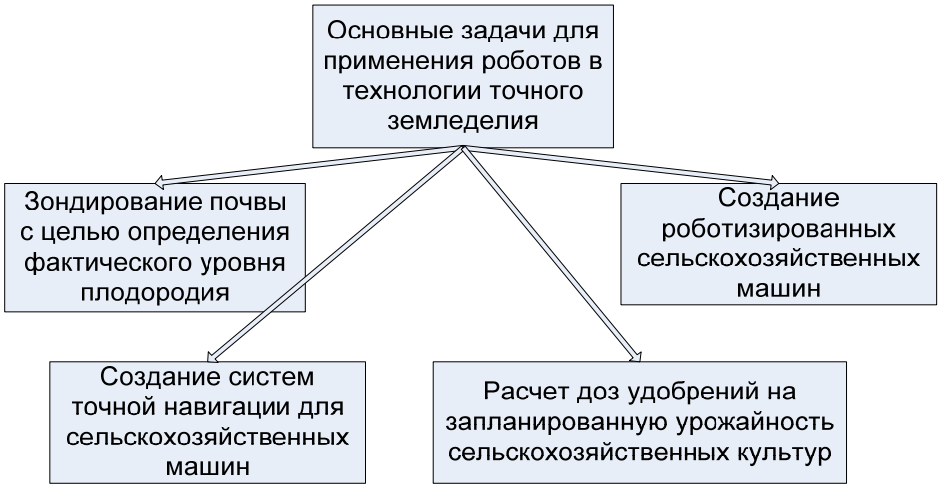


Рисунок 2 –Перечень основных научных и технических задач

Первой задачей является задача определения фактического уровня плодородия. Она заключается в выделении на сельскохозяйственных полях внутрипольных участков, различающихся по своему плодородию. Способы выявления агроконтуров можно разделить на дистанционные и наземные. Дистанционные способы идентификации пестроты почвенного плодородия и посевов могут выполняться по авиакосмическим снимкам или выполненных с беспилотных летательных аппаратов. Исследования показали, что дистанционное зондирование в радио- и фотодиапазонах электромагнитных волн может проводиться и по открытой (вспаханной), и по покрытой

растительностью почве [6, 7]. Например, ВНИИ агрохимии им. Д.Н. Прянишникова (ВНИИА) использовал радиолокатор установленный на космическом аппарате НПО Машиностроения «Алмаз-1». Этот датчик позволил выявить на полях ОПХ «Газырское» Краснодарского края внутрипольные участки, на которых при отборе и анализе почвенных проб установлена определенная корреляция между отдельными агрохимических показателями плодородия почвы и результатами радиолокационного сканирования. Важно отметить, что радиолокация позволяет проводить обследование вегетирующих посевов независимо от погоды и времени суток. Сходные результаты получены при дистанционном зондировании полей ОПХ Смоленского НИИСХ с космического аппарата «Ресурс-01» при использовании на нем фотоаппаратуры МСУ-Э, сканирующей электромагнитное излучение сельскохозяйственных полей в красном и ближнем инфракрасном диапазоне. Однако применение спутниковой аппаратуры является достаточно дорогостоящим и неоперативным. Альтернативное дистанционное обследование посевов озимой пшеницы в ОПХ «Газырское» в обычных (мелкоделяночных) полевых опытах с удобрениями осуществлено с применением вертолета, оснащенного фотометром. Коэффициент корреляции показаний фотометра с уровнем обеспеченности растений азотным питанием составил 0,9, что указывает на высокую эффективность проведенного диагностического обследования. В этой связи представляется весьма перспективным использование БПЛА – квадрокоптеров и других низколетящих аппаратов, фиксирующих состояние посевов с небольшой высоты, вследствие повышенной точности и оперативности диагностического обследования, низкой себестоимость диагностических работ.

К наземным способам выявления внутрипольных контуров плодородия почв относится автоматическое определение урожайности сельскохозяйственных культур, главным образом зерновых, в процессе их уборки, так как урожайность сельскохозяйственных культур тесно связана с уровнем почвенного плодородия. Специальные датчики, устанавливаемые на комбайнах и регистрирующие поток зерна, должны быть связаны с системой позиционирования и бортовым компьютером машины. Это позволяет при обработке полученных данных разделять поля на участки по уровню урожайности, используя их для отбора почвенных проб. И по результатам их агрохимического анализа составлять агрохимические картограммы полей.

Весьма перспективным является выделение агропочвенных контуров по результатам топографической съемки рельефа полей. Установлена непосредственная связь мезо- и микрорельефа полей с плодородием почвы, т.е. с различиями в агрохимических и агрофизических её свойствах в разных местоположениях на рельефе. По исследованиям ВНИИА на агрополигоне Центральной опытной станции была установлена вполне определенная зависимость агрохимических показателей - кислотности почвенной среды, содержания в ней отдельных элементов питания от топографии поля. Так, на повышенных участках агрополигона содержание нитратов в пахотном слое почвы превалировало над аммонием, а в пониженных, наоборот, содержание аммонийного азота было выше по сравнению с нитратным, что обусловлено миграцией высокоподвижных нитрат-ионов с водными потоками в пониженные участки и восстановлением их до менее подвижного аммония. Разработанный ВНИИА роботизированный способ ускоренной топографической съемки местности с использованием GPS- или ГЛОНАСС-навигаторов позволит использовать её в технологиях точного земледелия [8].

Ещё одним способом определения уровня плодородия является сканирование электропроводности почвы. Это возможно, поскольку при почти диэлектрических свойствах пород и минералов, образующих почвенный скелет, её электропроводимость зависит, главным образом от ионов, являющихся преимущественно элементами питания растений. Кондуктометрическими устройствами электропроводность определяется или непосредственно путём пропускания электрического тока между электродами, присоединенными к погружаемым в почву дискам, или по вторичной электромагнитной индукции, наводимой в почве движущейся над её поверхностью электрическим модулем прибора и считываемой кондуктометром сканирующего устройства [9] (рис. 3).

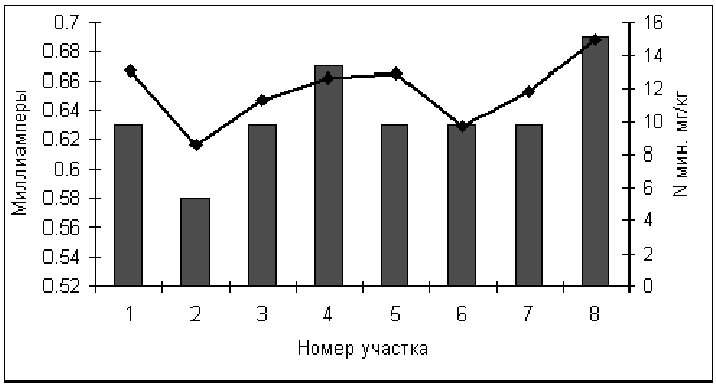


Рисунок 3 —Зависимость электропроводности почвы (столбцы)
от содержания в ней минерального азота (линия)

Дистанционное зондирование, сканирование урожайности и электросканирование почвы, ускоренное топографирование рельефа полей в сочетании с автоматизированным отбором проб почвы и использованием ГИС-технологий для обработки картографического материала полей позволяет существенно сократить затраты на агрохимическое обследование полей по сравнению с традиционным методом схематического отбора проб по элементарным участкам за счет уменьшения количества отбираемых почвенных проб, так как их отбор проводится не схематически, вслепую, а на агроконтурах, априори различающихся по своему плодородию и заранее выделенных на электронных картах полей. При этом отбор почвенных проб по новым технологическим принципам относится к роботизированным технологиям, поскольку производится пробоотборником автоматически с движением по выбранному маршруту и фиксацией мест отбора на дисплее и в памяти бортовой ЭВМ (рис. 4).

Рисунок 4 –Роботизированный отборник почвенных проб (ВНИИА)

В целом разработанные методы агрохимического обследования и картографирования характеризуются высокой степенью автоматизации, т.е. могут считаться роботизированными методами агрохимического мониторинга.

Следующий этап роботизации агрохимического обслуживания состоит в создании автоматизированных интерактивных программ расчета доз удобрений на запланированную урожайность сельскохозяйственных культур. Суть его заключается компьютеризации расчетных методов, основанных на результатах полевых опытов Географической сети ВНИИА и агрохимслужбы РФ. Расчет доз удобрений проводится в соответствии с полученными электронными агрохимическими картограммами плодородия почвы, планируемой урожайностью культуры, учетом качества предшественников, влагообеспеченности, особенностей рельефа полей, агрофизических свойств почвы, ряда других факторов. Разрабатываются способы бесконтактного (дистанционного) обращения пользователей (сельхозтоваропроизводителей, специалистов, руководителей различного иерархического уровня) с сервером ВНИИА, который по запросу должен в автоматическом режиме выдавать клиентам требуемую информацию. Освоение программ роботизированного расчета доз минеральных удобрений под важнейшие сельскохозяйственные культуры, возделываемые в земледельческих регионах страны, послужит основой для внедрения дифференцированного применения средств химизации, создаст условия для повышения их эффективности и экологической безопасности [10].

Завершающим этапом агрохимического обслуживания точного земледелия служит именно дифференцированное внесение удобрений. По имеющимся разработкам, это возлагается на роботизированные агрегаты, состоящие из трактора, навесного или прицепного разбрасывателя

удобрений (аппликатора), электронного оборудования, включающего борт-компьютер, навигатор GPS/ГЛОНАСС, систему автоматического вождения (автопилот), а для дифференцированной подкормки вегетирующих посевов удобрениями – дополнительные сенсоры. Пример такой машины приведён на рис. 5. По заложенной в бортовой компьютер карте-заданию, составленной по итогам агромониторинга и расчета оптимальных доз удобрений, роботизированный агрегат вносит их в соответствии с фактической потребностью растений на различных участках поля. [11]. В вопросах точной навигации сельскохозяйственных машин хорошие результаты получены в Институте проблем управления РАН [12].

Рисунок5 – Роботизированный агрегат для дифференцированного внесения удобрений

Эффективность технологий роботизированного, прежде всего дифференцированного, применения удобрений в условиях точного земледелия во многом зависит от выраженности внутрипольной пестроты почвенного плодородия. На полях, отличающихся выровненным плодородием, дифференцированное внесение агрохимических средств априори не требуется. По данным полевых опытов, проведенных в нескольких региона страны, достоверные прибавки урожайности зерновых от территориальной дифференциации доз удобрений получали, как правило, при уровне вариабельности агрохимических показателей плодородия выше 20%. По данным ВНИИА, от дифференциации доз органических удобрений прибавка урожайности зерновых культур в зависимости от содержания гумуса в почве колебалась в пределах 5,4-18% (в среднем 9,5%). Дифференцированное внесение минеральных азотных удобрений повышало их окупаемость зерновой продукцией в разных почвенно-климатических условиях от 10 до 30% (рис. 6).

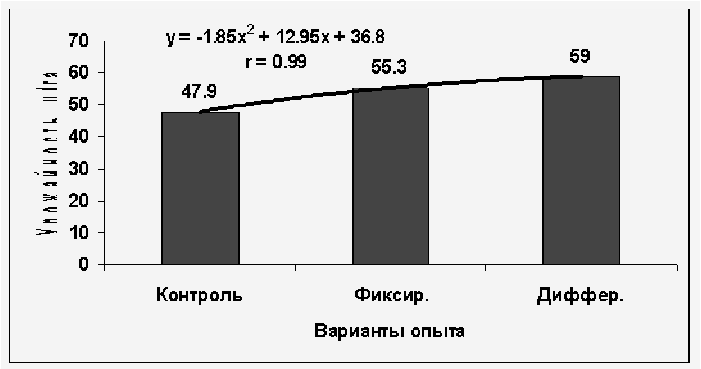


Рисунок6 –Эффективность дифференцированного применения азотных удобрений под яровой ячмень на дерново-подзолистой почве (2015 г.)

При этом существенно, на 10% и более, снижалась внутрипольная вариабельность урожайности, что имеет существенное значение для повышения качества продукции и улучшения условий уборки урожая. По результатам дифференцированной подкормки озимой пшеницы, выращенной на обыкновенном черноземе в ООО «Восток-Агро» Воронежской области роботизированным агрегатом, её урожайность возросла в среднем на 3 ц/га, что окупило затраты на приобретение технических средств для дифференцированного внесения удобрений за один год их эксплуатации.

В целом, роботизация как основа точного земледелия может быть эффективной практически повсеместно, поскольку она направлена, прежде всего, на повышение производительности труда. Что же касается дифференцированного применения удобрений, то оно эффективно лишь на полях с

выраженной вариабельностью почвенного плодородия. Но так как поля России почти повсеместно характеризуются высокой пестротой почвенного плодородия, роботизированные технологии точного земледелия, включая дифференцированное применение удобрений, имеют несомненную перспективу.

Работа над данным материалом поддержана Программой Президиума РАН №I.31 «Актуальные проблемы робототехники».

1. Крупеников И.А. История почвоведения. М.: «Наука», 1981.
2. Grau J.B., Anton J. M., Packianather M. S., Ermolov I., Aphanasiev R., Cisneros J. M., Cortina-Januchs M. G., Jevtic Aleksandar, Andina D., Sustainable Agriculture Using an Intelligent Mechatronic System, Proc. IECON: 2009 35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, Vols. 1-6.
3. Афанасьев Р.А. Дифференцированное применение удобрений – настоящее и будущее // Плодородие, № 4 (7),2002.
4. Afanasiev R., Groumpos P., Ermolov I., Iljuchin J., Poduraev J., Minimisation Of Soil Resources Use By Mechanised Differential Soil Fertilisation, Proc. Of Protek-98 International Conference, Moscow, Russia, 1998.
5. Прянишников Д.Н. Избранные сочинения. Т. 1. - М.: Колос, 1965. - С. 72.
6. Афанасьев Р.А., Благов А.В., Мейер О.Н. Усовершенствованный способ агрохимического обследования почв // Патент России № 2102748, 1998.
7. Афанасьев Р.А., Ширинян М.Х., Благов А.В., Мейер О.Н. Способ дистанционной диагностики озимой пшеницы вне зависимости от погодных условий и времени суток // Патент № 2075076. 1997.
8. Афанасьев Р.А., Байбеков Р.Ф., Беличенкко М.А., Березовский Е.В., Рухович О.В., Смирнов М.О., Сычев В.Г., Шишов С.А. Способ ускоренного выделения устойчивых внутрипольных контуров почвенного плодородия на сельскохозяйственных полях. Патент № 2455660. 2012.
9. Афанасьев Р.А., Аканов Э.Н., Сычев В.Г., Мерзлая Г.Е., Смирнов М.О. Способ определения удельной электропроводности почвы // Патент России № 2331070. 2008.
10. Сычев В.Г., Байбеков Р.Ф., Афанасьев Р.А., Державин Л.М., Поляков А.К., Казов Р.П., Ермилов С.И. Программа для ЭВМ автоматизированного расчета годовых доз минеральных удобрений на планируемую урожайность сельскохозяйственных культур «Интер-агрохим. Свидетельство о регистрации, № 2013616600, 2013.
11. Сычев В.Г., Байбеков Р.Ф., Измайлов А.Ю., Афанасьев Р.А., Личман Г.И., Пугачев П.М. Информационно-технологическое обеспечение точного земледелия // Плодородие, 2011. № 3.
12. Leick A., Rapoport L., Tatarnikov D., GPS Satellite Surveying, Wiley & Sons, 2015.

I.B. Sheremet, N.A. Rudianov, A.V. Ryabov, V.S. Khruschev

ABOUT NEED OF THE CONCEPTS DEVELOPMENT OF CONSTRUCTION AND APPLICATION OF MILITARY AUTONOMOUS ROBOTIC SYSTEMS

Ministry of Defence of the Russian Federation, Moscow

Abstract

This article discusses the construction of autonomous robotic systems of the Ground Forces and the challenges that it is advisable to place the promising autonomous robots. The conclusion of the feasibility of a stand-alone RTC group SV and the need to develop the concept of their construction and use.

Keywords: autonomous fighting robots and provide the Land Forces, the development and application.

И.Б. Шеремет, Н.А. Рудианов, А.В. Рябов, В.С. Хрущев

О НЕОБХОДИМОСТИ РАЗРАБОТКИ КОНЦЕПЦИИ ПОСТРОЕНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ АВТОНОМНЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Минобороны России, Москва

Аннотация

В статье рассматриваются вопросы построения автономных робототехнических комплексов Сухопутных войск (РТК СВ) и задачи, которые целесообразно возложить на перспективные автономные роботы. Делается вывод о целесообразности группового применения автономных РТК СВ и о необходимости разработки концепции их построения и применения.

Ключевые слова:автономные боевые и обеспечивающие роботы Сухопутных войск; разработка и применение.

В настоящее время практически все разрабатываемые и принятые на снабжение наземные робототехнические комплексы Сухопутных войск (РТК СВ) используются в режиме дистанционного управления. Опыт применения таких роботов в Ираке и Афганистане показал их невысокую эффективность, особенно в вариантах оснащения боевыми средствами. Реально управлять боевым роботом в одиночку в условиях противоборства невозможно: один оператор неспособен одновременно отвечать за движение робота, разведку обстановки, поиск и выбор цели, обстрел и оценку результатов стрельбы, принятие тактических решений. В случае, когда роботизированный комплекс оснащается вооружением ближнего боя, применение мобильных роботов становится нерациональным – эффективное их применение требует нескольких операторов. Кроме того, дистанционно-управляемые РТК СВ имеют ряд принципиальных недостатков и ограничений, обусловленных необходимостью постоянного информационного обмена, а именно: повышенные требования к каналу связи, ограниченный радиус действия, демаскировка объекта и пункта управления, а также возможность применения средств радиоэлектронного и огневого противодействия, вследствие интенсивного радиообмена. Поэтому, несомненно, дальнейшее развитие военной и специальной мобильной робототехники связано с повышением автономности РТК СВ за счет передачи функций, выполняемых человеком-оператором, бортовым средствам.

Ключевыми направлениями развития современной отечественной робототехники военного назначения являются [1]:

комплексный подход к развитию робототехнических комплексов военного назначения (РТК ВН) и их элементов;

увеличение количества РТК ВН и областей их применения;

расширение функциональных возможностей РТК ВН;

групповое применение РТК ВН;

повышение уровня автономности отдельных РТК ВН и их групп;

повышение эффективности функционирования мобильных РТК ВН независимо от условий среды.

Анализ требований [2], предъявляемых к РТК ВН для применения в составе комплекта вооружения СВ показывает, что некоторые из них реально выполнимы в ближайшее время, однако, как показывает опыт применения РТК в силовых ведомствах, ряд проблем, и в первую очередь вопросы связи и электромагнитной совместимости решены с должным качеством будут не скоро.

Выходом из создавшейся ситуации является интенсификация исследований по повышению автономности РТК [3] и внедрение в военную робототехнику интеллектуальных систем принятия решений на этапах управления, в том числе группового, автономного движения и применения оборудования по назначению, включая вооружение.

Некоторые элементы автономности, такие как запоминание маршрута и возврат в точку потери связи, обход препятствий по данным бортовых систем при супервизорном управлении и ряд других экспериментально проверены на макетных образцах и уже закладываются в возможности разрабатываемых роботов. Однако, для осуществления полноценной автономности необходимо решить ряд проблем. Среди них:

отсутствие отечественных сенсоров для систем технического зрения (тепловизоров, 2D- и 3D-сканирующих лазерных дальномеров, в том числе и комплексированных с видеокамерами), обеспечивающих определение геометрии и опорной проходимости грунта;

отсутствие высокоточных бортовых средств навигации и восстановления геометрии окружающего пространства, необходимых для функционирования РТК СВ в условиях экранирования магнитного поля Земли и навигационных полей спутниковых и стационарных систем (индустриально-городская среда, здания, помещения);

проблемы разработки тактики применения автономных РТК СВ, включая организационно-правовые проблемы применения оружия в случаях отсутствия непосредственного управления оператором;

проблемы автономного применения целевой нагрузки, включая разработку алгоритмов обнаружения, распознавания типа цели, «узнавания» конкретной цели, наведения оружия или иных средств;

проблемы скрытной связи, силовых установок РТК, трансмиссии и движителей, датчиков различной природы и ряд других.

Часть из этих проблем имеют перспективы решения в обозримом будущем техническими и технологическими методами, часть требует организационно-правовой экспертизы и выработки соответствующих решений по правилам применения автономных РТК СВ. Однако, некоторые проблемы требуют интенсивных исследований и экспериментальной проверки возможности их использования. Прежде всего, это касается осуществления режима автовождения с оценкой опорной проходимости грунта, решения задач восстановления геометрии окружающего пространства и высокоточной навигации при автономном функционировании роботов и их групп, находящихся на значительном удалении от центра управления, при выполнении ими боевых и обеспечивающих задач.

К сожалению, до сих пор под автономными роботами понимались, в основном, РТК с системами автовождения, без учета навесного оборудования для выполнения целевой функции. По нашему мнению автономным робототехническим комплексом военного назначения СВ можно назвать РТК, способный целенаправленно перемещаться в неструктурированной среде и выполнять с помощью своего оборудования задачи, определенные ему в соответствии с целевой установкой, без непосредственного участия человека.

Основными следствиями повышения автономности мобильных РТК СВ являются:

- существенное повышение уровня помехоустойчивости РТК СВ;
- повышение дальности применения РТК СВ, ограничивающейся практически только ресурсами энергоустановки;
- снижение числа неправильных действий при применении РТК СВ, вызванных ошибками человека-оператора;
- снижение количества операторов и снижение требований к операторам;
- возможность одновременного применения большого числа РТК (групповое выполнение задач);
- исключение или значительное упрощение человеко-машинного интерфейса из состава РТК, высвобождение энергетических, коммуникационных, вычислительных и иных ресурсов, использующихся в составе этого компонента; исключение задержек, вызванных преобразованием информации для оператора, а также временных задержек, связанных с принятием решений;
- расширение возможных областей применения РТК СВ.

Из всего комплекса задач, которые в перспективе планируется возложить на РТК СВ, некоторые решать с помощью автономных роботов нецелесообразно. К ним относятся, например, задачи охраны и обороны объектов тыла, разминирование, розыск раненых и больных, транспортировка раненых и другие, требующие непрерывного контроля со стороны оператора.

Автономность РТК СВ имеет смысл только для роботов на базе, позволяющей разместить аппаратуру автономного движения, поэтому для РТК СВ типа «забрасываемый» и «носимый» основным способом управления останется дистанционное. Под большим вопросом находится целесообразность автономного управления при функционировании внутри помещений.

Основными областями применения автономных роботизированных образцов военной техники Сухопутных войск, обеспечивающих решение различных задач боевого, технического и тылового обеспечения могут быть:

повышение уровня ситуационной осведомленности – аудио-видео и инфракрасная разведка и наблюдение, вскрытие замыслов противника, оценка потенциальных угроз, определение целей для поражения, места их расположения (координаты);

обеспечение оборонительных действий тактических формирований путем создания системы роботизированных огневых точек в полосе прикрытия подразделений для ведения борьбы с живой силой и бронированными целями противника, действия из засад в целях нанесения потерь, задержки развертывания противника на запланированных рубежах;

обеспечение огневой поддержки наступающих частей и подразделений и подавление огневого противодействия в тылу противника за счет применения автономных РТК СВ, оснащенных автоматическим оружием и противотанковыми средствами;

артиллерийская разведка и обслуживание стрельбы наземной артиллерии;

радиационная, химическая и биологическая разведка на зараженных территориях;

доставка боеприпасов, ГСМ и иных грузов подразделениям, находящимся в зоне огневого воздействия противника;

организация связи и радиоэлектронного противодействия;

доставка специальных технических средств, в том числе мин, организация информационных полей путем установки необслуживаемых датчиков;

имитация боевой техники (маскировка);.

устройство минно-взрывных заграждений под огнём противника, доставка и установка мин;

доставка и применение нелетального оружия.

С учетом технологических возможностей промышленности на ближайшую перспективу можно при тактических действиях мотострелковых подразделений предложить, в частности, следующие варианты применения автономных РТК:

В маневренной обороне батальона:

- в составе боевого охранения и разведывательных дозоров – два автономных разведывательных РТК и четыре автономных разведывательно-ударных РТК легкого класса;
- в составе огневых засад – четыре автономных разведывательно-ударных РТК среднего класса;
- при организации непосредственного охранения и самообороны подразделений (командного пункта) батальона в составе патрулей, секретов, сторожевых и наблюдательных постов – два ДУ разведывательных РТК и два ДУ разведывательно-ударных РТК легкого класса, два ДУ разведывательно-ударных РТК среднего класса;
- при прикрытии стыков и брешей – до восьми автономных ударных РТК тяжелого класса.

В наступлении батальона:

- при прикрытии флангов – четыре автономных разведывательно-ударных РТК легкого класса;
- при обеспечении ввода в бой 2-го эшелона батальона – два ДУ разведывательно-ударных РТК легкого класса и четыре ДУ разведывательно-ударных РТК среднего класса;
  при участии в отражении контратаки противника - два ДУ разведывательно-ударных РТК легкого класса и шесть ДУ разведывательно-ударных РТК среднего класса;
- при действиях на участке прорыва под огнём своей артиллерии (под воздушными разрывами своих снарядов) – до восьми автономных ударных РТК тяжелого класса.

Применение автономных РТК с противотанковыми средствами на рубежах развертывания для отражения атак (контратак) позволит создать благоприятные условия для поражения бронированных объектов противотанковыми средствами, а применение в составе подразделений артиллерийской разведки - позволит увеличить полосу оптической разведки, повысит возможности разведки на труднодоступной местности и снизит количество в зон невидимости.

Одним из сдерживающих факторов использования автономных РТК СВ является высокая стоимость обеспечения автономного движения робота. В общем случае для качественного обеспечения автодвижения в состав аппаратуры входят:

трехмерный лазерный дальномер;

двумерный лазерный дальномер;

камеры стереосистемы;

камера опорной проходимости;

тепловизор;

ультразвуковые датчики;

акселерометр измерения вибрации;

интегрированная инерциально-спутниковая навигационная система;

дальномеры-пенетрометры.

Помимо этого для определения опорной проходимости в перспективе возможно использование георадара, чье применение в настоящее время ограничено неприемлемыми массо-габаритными размерами и несовершенством методов обработки сигнала, не позволяющим использовать этот универсальный датчик с должным качеством в режиме реального времени.

При этом аппаратура, обеспечивающая автономное движение, является наиболее уязвимой в общевойсковом бою.

Поэтому необходима разработка методов обеспечения доставки РТК в назначенную зону действий наименее затратными способами. Например, это осуществимо, если аппаратурой автоматического движения оснащен один (или несколько, но не все) РТК группы, а остальные движутся по пути, указанному ведущим, а на месте разворачиваются в определенный им порядок.

Применение оружия автономным РТК СВ или наведение оружия, примененного с другого носителя, должно быть санкционировано оператором. Это разрешение может быть получено, например, после передачи изображения или данных о цели по телекодовой связи, «узнавания цели», заранее назначенной оператором или других методов. При этом отсутствие постоянной связи с КП и необходимость скрытного функционирования предъявляют высокие требования к уровню интеллекта автономного РТК СВ. Информация, передаваемая роботом во время сеанса связи должна содержать не только координаты, характеристики и изображение цели, но и совет по принятому решению для

утверждения его у оператора. По видимому, в каждом конкретном случае целесообразно определять степень участия в принятии решений каждого робота в группе.

Даже это предварительное перечисление проблем показывает, что целесообразное использование автономных РТК СВ возможно лишь при условии их группового применения и распределения решаемых задач между роботами в группе. Разработка одиночных автономных роботов имеет смысл только для решения специальных задач.

Таким образом, даже предварительный анализ путей и возможных областей применения автономных РТК СВ показывает острую необходимость разработки согласованной концепции автономных РТК.

1. Лапшов В.С., Носков В.П., Рубцов И.В., Рудианов Н.А., Гурджи А.И., Рябов А.В., Хрущев В.С. Перспективы разработки автономных наземных робототехнических комплексов специального военного назначения//Известия ЮФУ. Технические науки. №1 (174)- Таганрог: Технологический институт ЮФУ, 2016.- с.156-168.
2. Дульнев П.А., Ильин Л.Н. Некоторые подходы к развитию системы вооружения соединений нового облика Сухопутных войск/Вестник Академии военных наук. – 2012. - № 1(38) с.126-134.
3. Рудианов Н.А., Рябов А.В., Хрущев В.С., Лапшов В.С., Носков В.П., Рубцов И.В. Бой в городе. Боевые и обеспечивающие роботы в условиях урбанизированной территории. // Таганрог: из-во Технологического ин-та Южного федерального университета, ж. «ИзвестияЮФУ. Техническиенауки» №3, 2011. С. 142-146.

V.P. Andreev, Yu.V. Poduraev

FUNCTIONAL–MODULAR DESIGN OF HETEROGENEOUS MOBILE ROBOTIC SYSTEMS

MSTU «STANKIN», International Laboratory «Sensorika»,
International Institute of the New Educational Technologies, RSUH, Moscow
andreevvipa@yandex.ru, poduraev@mail.ru

Abstract

This is a brief overview of studies in the field of modular robotics. We formulate the aim and problems of the development of the functional–modular principle of heterogeneous mobile robot construction. We describe the main principles of the construction of an information–measuring and control system (IMCS) for the robot. We propose to use a network-based IMCS of the modular mobile robot. This concept is based on the functional completeness of each module, which is an electronic and/or mechatronic device with its own control system.

Keywords: mobile robot, modular robot, heterogeneous modular robot, robotic system, local area network, information-measuring and control system

Introduction

Robotic systems are widely used in industry, medicine, and everyday life, especially in solving the problems related with emergency situations and military defense. At present, the application of these systems usually depends on their structure, which leads to a large variety of design and engineering solutions. The main execution, information, and control components of these robotic systems are normally designed to be used in a particular system alone. The electronic and mechanical units of these systems cannot be structurally and functionally separated from their general design. Their software is unique and is normally based on a single powerful computer. All these factors make it difficult or even impossible to use these units in other similar systems. The fact that these robotic systems are expensive restricts the extent of their application.

The modular principle of robotic systems construction makes it possible to substantially scale down the variety of technical solutions, thus reducing the cost of final devices through the unification of hardware and relevant software. The modular architecture has long been used in machine-tool industry and makes it possible to develop flexible and fault-tolerant systems with small mass-dimensional characteristics and low cost of manufacture.

Modular robotics

The modular principle of robotic systems construction is a new research line with its main solutions having been implemented in the CEBOT robot [1] in 1987. The modular robots consist of individual

components or nodes (modules), which are combined together to form an integral and independent robotic system. Each module can contain electronic, sensor, and/or control devices and actuators.

By their construction type, the modular robots can be divided into *homogeneous* and *heterogeneous* ones. In homogeneous robots, all modules are identical to each other and are separate functional units. These devices can change their configuration by restructuring their components. In heterogeneous robots, each module implements a separate function, which makes it possible to change the robot configuration by choosing an appropriate set of modules in line with the intended use of the robot.

By the method of their structure formation, the modular robots can be *reconfigurable* and *self-reconfigurable*. A considerable amount of well-known products in this field addresses self-reconfigurable homogeneous robots, such M-TRAN, ATRON, and SuperBot [2–4]. It is believed that in the long-term perspective the self-reconfigurable robots must be heterogeneous because the each module in homogeneous robots has to be additionally supplied with all the necessary components (sensors and/or actuators), which highly complicates the system [5]. Heterogeneous robots are more versatile and flexible [6–9] but usually not self-reconfigurable.

Modern products of heterogeneous modular robots

Thor [6] (Fig. 1). The concept of this robot is partially based on its "ancestor"—the Odin heterogeneous robot [7], the modules of which were morphologically homogeneous. A distinctive feature of Thor is that it is based on the submodular principle of the construction of functional units (a total of eight modules); each module executes only one simple function. In other words, certain function of a single unit of the robot must be divided between several simpler modules. For example, the gripping module (which is composed of the gripper itself, actuator, and batteries) is proposed to be replaced by subfunctional modules: actuator, batteries, and a large set of gripping mechanisms, joints and wheels. The main advantage is that the individual submodules can be easily constructed, which allows other submodules to be quickly produced. More expensive submodules of the motor–module type are used only where required. Using different combinations of modules, one can construct mobile robots of different purposes.

Figure 1 – Computer model of Thor

The morphological heterogeneity and subfunctional modularity simplify the robot structure and increase the flexibility of its construction. However, if the modules become extremely simplified, the labor intensity in the construction assembly increases and the corresponding software becomes more complex as an element of the control system.

Robot for operations in space [8] (Fig. 2). Originally, the system involved three types of modules: *module-actuator,node module,* and *communication and control module*. The module-actuator is a module with servo-actuator and articulated coupling. The node module is a structure with five pin platforms allowing for different angles of coupling between the modules (including 90º and 120º). Also, the node module provides power transmission and data exchange between coupled modules. The communication and control module allows the robot to operate autonomously or by wire and can be equipped with batteries. Then, "foot"-modules equipped with tactile sensors were developed. In addition, a new module (digital TV-camera) was introduced that can transmit images through a wireless channel to the host computer; this avoids the need for high capacity of the inter-module interface.

Figure 2 – A robot for operations in space

The modules communicate with each other and with one or more upper-level computers by using a special-purpose peering network. Any module can send data packets to another module, which ensures a distributed control. The resulting modules were tested in different configurations: a classic "snake-like" manipulator, a robot with multiple manipulators, and a walking robot with three or four walking drivers.

Due to the simple structure of modules, which is focused on rapid production, the use of new functional modules is simple and inexpensive. However, the use of a peer-to-peer network operating on the basis of the equality principle seems to be unjustified because the modules have different functional purposes and

therefore are essentially unequal. In this case, the modules can only serve as a source of information (sensors) and/or receivers of simple instructions; the modules have no individual control system.

SMART [9]. This is a reconfigurable heterogeneous modular robotic system consisting of a set of interchangeable modules. The main purpose of this robot is to create modules that preserve the balance between versatility, low production cost, and functionality. The construction of modules implies that they can be quickly developed and produced at minimum economic costs. The system architecture is formed of modules such as *Modules*, *M–Robots*, and *Colonies*.

Modules are the basic components of the system and can be divided into three main types: power/control modules (P/C-modules), joint modules (J), and specialized modules (S). The *M-Robot* is an autonomous system that is based on at least one P/C-module and one or more J and S modules. The *Colony* contains several *M-Robots* operating jointly to accomplish a given task.

The *P/C-module* (power/control) controls over all actuators of other modules, processes the sensor data, and controls the information exchange between other P/C-modules and the control station. The module contains basic electronic devices, power supply, peripheral communications (CAN-bus and Bluetooth), and connection interfaces.

The module control system is based on the master–slave architecture. Accordingly, there are two software types: master software (*Ms*) and slave software (*Ss*). *Ms* controls the external communication via Bluetooth and synchronizes *Ss* within the robot configuration. In the *M-Robot*, *Ms* is responsible for preprocessing of instructions and their distribution among the remaining *Ss* via the CAN-bus. The data transmitted within the *M-Robot* has the form of low-level instructions, such as indicators for feedback control by position, data for synchronization, and data received from sensors and actuators. *Ss* receives messages via the CAN-bus and executes a desired low-level command.

The *Joint module* (*J*) is any active or passive actuator of the rotary, linear (prismatic), or spherical types, and their combinations. The module is controlled by a *P/C-module*, which also supplies it with power. The *J-module* may contain control electronics as well.

The *specialized module* (*S*) is designed for executing specific tasks. The module can be a special sensor that conducts data processing of its own, a specialized tool, or inexpensive constructs of passive "extremities" such as foot, wheel, a hybrid of foot and wheel, flange, and platform as an operating body of the robot.

The control over the configuration of a robot or robotic system (*Colonies*) is implemented through the following two types of communication between modules: Intra-robot and Inter-robot. The Intra-robot communication contains those P/C-modules that are incorporated into the structure of one and the same M-Robot. The Inter-robot connects the M-robot with the control station. The two communication types operate via the CAN-bus and Bluetooth technology, respectively.

The set of modules makes it possible to create different variants of robotic devices. A commonvariant of the M-Robot is an autonomous device consisting of at least one P/C-module, J-module, and S-module. Different module combinations allow the device to be reconfigured or self-reconfigured.

One of the most important features of the SMART robot is that each module can be designed, on the one hand, as a structurally and constructively simple and inexpensive device and, on the other hand, as a complex and high-performance device with its intellectual component.

The most interesting and promising solution seems to be the SMART robot. However, the use of CAN-bus and Bluetooth as a communication environment restricts the functional capabilities of this robot due to the limited capacity of these communication channels and rules out the possibility of remote and supervisory control over the robot at large distances. In addition, the structure of the robot IMCS and the module interaction interfaces do not allow third-party products to be used as modules, which reduces the efficiency of the production of these robots.

The analysis of these examples of different modular heterogeneous robotic systems allows us to conclude that the modular principle of robots construction is of current interest and promising.

Objectives and tasks

This study is proposed to be based on the functional–modular principle of the organization of the IMCS of mobile robots (MR). This is a difficult task because it is necessary to identify the functionally complete parts of the IMCS (modules) and develop universal software and hardware interfaces that allow the modules to be combined into systems of various functional purposes. Then, a new feature appears: depending on the MR purpose, its configuration is changed through an appropriate composition of different modules that are independent functional elements.

The system mobility complicates the solution of this problem since the communication of the mobile part with a control system that is located far away (for variants of remote and supervisory control) is based on a radio channel with all of its shortcomings.

To solve this problem, we propose a new approach: consider the IMCS of the robotic system as a *local area network* (LAN) with mobile nodes and develop appropriate *network software* that makes the system scalable and reconfigurable [10]. Each LAN node is a modular mobile robot with an IMCS that is also a LAN, the nodes of which are functional modules. The final modules produced on the basis of this principle can be directly used in other robotic systems.

Theaim of this study is to develop a functional–modular principle of the construction of the software and hardware unit of heterogeneous mobile robotic systems.

The tasks of this study are:

- Develop a MR IMCS structure allowing the robot to be represented as an interaction of individual functionally complete units – modules.
- Determine the minimum set of functionally complete units of the MR IMCS in terms of their implementation as individual mechatronic and/or electronic modules.
- Formulate the functionality of each module and specify the requirements for the module construction as well as communication channels and interfaces (both hardware and software).
- Develop a universal program interface for the interaction of modules, taking into account their upgradability (without changing the functionality) and the possibility of remote dynamic reprogramming of their computing devices.
- Develop a structure of information interaction between MR modules with scalability, reconfigurability, and hardware implementation.
- Develop a user interface for the MR supervisory control system via the Internet and radio channels.
- Develop and produce a laboratory prototype of functional–modular mobile robots, including sensory, execution, control, computing, communication, and program units.
- Conduct an experimental study of the efficiency of the proposed solutions and variants of functional elements.

Main concept of the functional–modular principle

The project conception suggests the following main principles for the construction of information-measuring and control systems of a modular MR:

(1) Each *module* is a functionally complete electronic or mechatronic device.
(2) The robot IMCS is constructed as a local area network, the nodes of which are *modules*.
(3) The principle of distributed control is used.
(4) The hardware unit of modules is constructed using the principle of distributed stabilized power.
(5) Each *module* is supplied with appropriate software (driver).

The functional completeness of modules means a structural and functional independence, which makes it possible to use third-party modules identical to replaced modules by their functionality.

The network principle of ICMS construction makes the robot reconfigurable and scalable. The use of the Ethernet technology provides a capacity of inter-module communication channels of up to 1000 Mbit/s and makes it possible to use the entire family of TCP/IP protocols and other protocols that are widely used on the Internet together with appropriate libraries. In addition, one can use secure digital radio channels (such as those based on the Wi-Fi standard) for remote control.

The principle of distributed control means the following. Each mechatronic or electronic module has its own control system implemented on the basis of a microcontroller and, when necessary, using its own sensory system and actuators. These elements of the module control system ensure its functional completeness. In this case, each module can independently perform a limited set of functions, and the external (general) control system generates a local purpose, determines the sequence of executable functions, and transmits only the necessary instruction parameters to the module, receiving a report on their execution in response: this generates a data loopback [11]. As a result, the whole computing process implementing the general operation of MR can be parallelized.

The principle of distributed stabilized power is implemented as follows. The general nonstabilized power of the robot, including the electric drive, is supplied by a separate module containing accumulator storage batteries. Here, each module has a separate stable voltage generator (SVG) designed for power supply inside module devices (for example, microprocessors). The SVG input receives voltage directly from accumulator storage batteries. When there are input voltage pulsations caused, for example, by starter currents of electric motors, the SVG prevents the possible interruption of the program code by intramodule computing devices.

Besides, this distributed power supply does not impose a limit on the power consumption by each module; it is merely necessary to limit the total power consumed by all modules from accumulator storage batteries. If the total power consumption is exceed, one only needs to replace a single module by a module with more capacious batteries. In addition, the released heat is distributed between modules, rather than concentrated in a single power supply unit, which would require radiators.

"*The concept of drivers*" is that for each mechatronic device a unified network control protocol is created on the basis of existing low-level program interfaces of communication [12]. Then, the producer can relatively easily integrate its device into the IMCS of the modular MR, creating only an additional driver that implements the protocol-based program control instructions and the networking protocols. When a new mechatronic device appears in the network, the software of the central control system automatically puts this device into the network during the interaction with the driver. The fact that each module has a computing device and the network principle of the construction of the IMCS of modular MR make it possible to create an appropriate driver for a given module and thus ensure that third-party modules can be involved in the network without reworking their low-level code.

Conclusions

The structure of a modular MR is formed from the set of special modules, the type, function, and number of which depend on the robot purpose. The functional–modular principle of the construction of mobile robotic systems developed in this project makes it possible to create universal modules, which can be used to construct mobile robotic systems for different purposes [13].

Figure 3 shows possible variants of a heterogeneous modular MR. The wheel robot of vertical design can be transformed with the help of a simple of modernization into a track-mounted go-anywhere robot of horizontal design that is structurally assembled from the same modules.

Using functionally similar modules but with a different design, one can obtain a variant of the underwater research robot, but the bodies of its modules are made of a more durable material that can withstand high pressure at large depths.

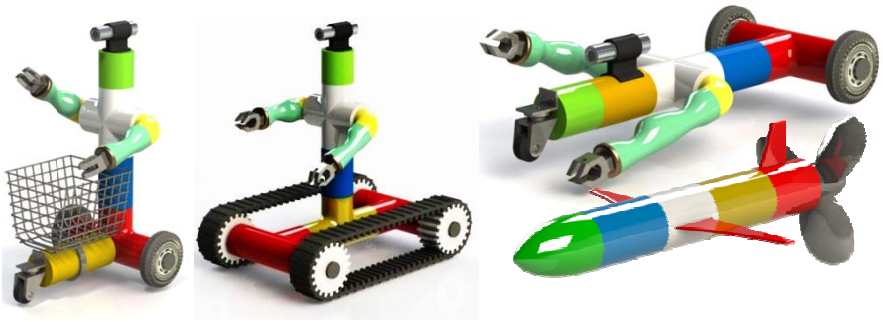


Figure 3 – Variants of heterogeneous modular mobile robots (computer prototypes)

This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, project no. 16-07-00811a.

1. Fukuda T., S. Nakagawa, A dynamically reconfigurable robotic system (concept of a system and optimal configurations), In Proceedings of IECON '87: 1987 International Conference on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation, 1987.
2. S. Murata, E. Yoshida, A. Kamimura, H. Kurokawa, K. Tomita, and S. Kokaji, M-TRAN: self-reconfigurable modular robotic system, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 7(4):432–441, 2002.
3. E.H. Østergaard, K. Kassow, R. Beck, and H.H. Lund, Autonomous Robots, Design of the ATRON lattice-based self-reconfigurable robot, 21(2):165–183, 2006.
4. Salemi B., M. Moll, and W.-M. Shen, SUPERBOT: A deployable, multi-functional, and modular self-reconfigurable robotic system, In Proceedings, IEEE/RSJ Intl. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pages 3636–3641, Beijing, China, 2006.
5. Fitch R.C. Heterogeneous Self-Reconfiguring Robotics, PhD thesis, Dartmouth College, Hanover, New Hampshire, USA, 2004.
6. Lyder A.H., Stoy K., Mendoza-Garcia R.-F., Larsen J.C., and Hermansen P., On sub-modularization and morphological heterogeneity in modular robotics, In Sukhan Lee, Hyungsuck Cho, Kwang-Joon Yoon, and Jangmyung Lee (Eds.), Intelligent Autonomous Systems 12, volume 193 of Advances in Intelligent Systems and Computing, pp. 649-661. Springer Berlin Heidelberg, 2013.

7. A. Lyder, R.F.M. Garcia, and K. Stoy, Mechanical design of ODIN, an extendable heterogeneous deformable modular robots, In Proceedings, IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems, ph.883–888, Nice, France, 2008.
8. Hancher M. D., Hornby G. S., A modular robotic system with applications to space exploration, 2nd IEEE International Conference on Space Mission Challenges for Information Technology (SMC-IT'06), Pasadena, CA: IEEE, 2006, pp. 132–140.
9. J. Baca, M. Ferre, and R. Aracil, A heterogeneous modular robotic design for fast response to a diversity of tasks, Robotics and Autonomous Systems, vol. 60, no. 4, pp. 522–531, 2012.
10. Pryanichnikov V.E., Andreev V.P., The Application of Network Technologies to Constructing Group Controlled Systems with Machine Vision for Mobile Robots, In 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.
11. Andreev V.P., and Pletenev P.F., Developing Inter-Modular Communication for Heterogeneous Mobile Robot, In Proceedings of the International Scientific and Technical Conference “Extreme Robotics”. – St. Petersburg, 2016 (the present book).
12. Andreev V.P., Kirsanov K.B., Poduraev Yu. V., Geographically distributed “multi-operator” control of robotized systems using network technologies, In Proceedings of the International Scientific and Technical Conference “Extreme Robotics”. – St.Petersburg: “Politechnika-service”, 2015. – P.67-71.
13. Andreev V.P., and Kim V.L., Development of Functional Units of a Heterogeneous Modular Mobile Robot, In Proceedings of the International Scientific and Technical Conference “Extreme Robotics”. – St. Petersburg, 2016 (the present book).

В.П. Андреев, Ю.В. Подураев

ФУНКЦИОНАЛЬНО-МОДУЛЬНЫЙ ПРИНЦИП ПОСТРОЕНИЯ ГЕТЕРОГЕННЫХ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ

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

Аннотация

Приведён краткий обзор работ в области модульной робототехники. Сформулирована цель и перечислены задачи исследования по разработке функционально-модульного принципа построения гетерогенных мобильных роботов. Сформулированы основные принципы построения информационно-измерительной и управляющей системы (ИИУС) такого робота. Предложено использовать сетевую организацию ИИУС модульного мобильного робота. В основе концепции лежит функциональная завершённость каждого модуля, который представляет собой электронное и/или мехатронное устройство, имеющее собственную систему управления.

Ключевые слова: мобильный робот, модульный робот, гетерогенный модульный робот, робототехнический комплекс, локальная вычислительная сеть, информационно-измерительная и управляющая система.

Введение

Робототехнические комплексы широко используются в промышленности, в медицине, в быту, особенно при решении задач МЧС и обороны. В настоящее время предназначение таких систем, как правило, определяет их конструкцию, что приводит к большому разнообразию конструкторских и технических решений. Основные исполнительные, информационные и управляющие компоненты таких робототехнических комплексов обычно предназначаются для использования только в конкретной системе. Электронные и механические узлы подобных систем не могут быть конструктивно и функционально отделены от общей конструкции. Их программное обеспечение (ПО) уникально и, как правило, выполняется на одном мощном вычислителе. Всё это затрудняет или даже исключает возможность использования этих узлов в других подобных системах. Высокая стоимость таких робототехнических комплексов ограничивает широту их применения.

Модульный принцип построения роботизированных систем позволяет существенно уменьшить разнообразие технических решений, что обеспечивает снижение стоимости конечных устройств за счёт унификации оборудования и соответствующего ПО. Модульная архитектура, давно применяемая в станкостроении, позволяет создавать гибкие и отказоустойчивые системы при небольших массогабаритных характеристиках и низкой стоимости изготовления.

Модульная робототехника

Модульный принцип построения робототехнических устройств является сравнительно новым направлением, основные решения которого были реализованы в роботе CEBOT [1] в 1987г. Модульные роботы состоят из отдельных компонентов или узлов (модулей), которые в сочетании между собой образуют целостную, самостоятельную робототехническую систему. Каждый такой модуль может содержать электронные, сенсорные и/или управляющие устройства, актуаторы.

По типу конструкции модульные роботы делятся на гомогенные и гетерогенные. В гомогенных роботах все модули идентичны между собой и являются самостоятельными функциональными элементами. Такие устройства способны менять свою конфигурацию за счёт перестановки их составных частей. В гетерогенных роботах каждый модуль реализует отдельную функцию, что позволяет изменять конфигурацию робота, подбирая нужный комплект модулей в соответствии с целевым назначением робота.

По способу формирования своей структуры модульные роботы разделяют на *реконфигурируемые* и *само-реконфигурируемые*. Значительная часть известных разработок в данной области посвящена само-реконфигурируемым гомогенным роботам: M-TRAN, ATRON, SuperBot [2 - 4]. Считается, что в перспективе само-реконфигурируемые роботы должны быть гетерогенными, поскольку в гомогенных роботах дополнительное снабжение каждого модуля всеми необходимыми компонентами (датчиками и/или приводами) существенно усложняет систему [5]. Гетерогенные роботы обладают бóльшей универсальностью и гибкостью [6 - 9], но обычно не являются само-реконфигурируемыми.

Современные разработки гетерогенных модульных роботов

Робот Thor [6] (рис.1). Концепция робота частично базируется на его «прародителе» – гетерогенном роботе Odin [7], модули которого были морфологически гомогенными. Отличительная особенность робота Thor в том, что в нём реализован субмодульный принцип построения функциональных узлов (всего восемь модулей) – каждый модуль выполняет только одну простую функцию. Иными словами, некоторая функция какого-либо одного узла робота должна быть разделена между несколькими более простыми модулями. Например, вместо модуля захватного устройства, в состав которого входят собственно схват, привод и батареи, предлагается реализовать суб-функциональные модули: привод, батареи и большой набор захватных механизмов, шарниров и колёс. Главное преимущество – индивидуальные суб-модули легко конструировать, что позволяет быстро производить другие суб-модули. Более дорогие суб-модули типа мотор-модуля применяются только там, где это нужно. Используя различные сочетания модулей, можно конструировать мобильные роботы разного целевого назначения.

Рисунок 1 – Компьютерная модель робота Thor

Морфологическая гетерогенность и суб-функциональная модульность упрощают структуру модулей и повышают универсальность конструкции робота. Однако предельное упрощение функционала модулей приводит к увеличению трудоёмкости при сборке конструкции и повышает сложность соответствующего ПО как элемента системы управления.

Робот для работы в космосе [8] (рис.2). Первоначально система включала в себя три типа модулей: *модуль-привод*, *узловой модуль* и *модуль связи и управления*. Модуль-привод – это модуль с сервоприводом и шарнирным сочленением. Узловой модуль – это структура с пятью контактными платформами, допускающая различные углы соединения между модулями, включая 90º и 120º. Узловой модуль также обеспечивает передачу электроэнергии и обмен информацией между подключаемыми модулями. Модуль связи и управления позволяет роботу функционировать автономно или по проводу, он может быть укомплектован батареями. Затем были разработаны модули - «ступни», оснащённые тактильными датчиками. Также был введён новый модуль –цифровая телекамера, которая передаёт изображение по беспроводному каналу управляющему компьютеру; тем самым, исключается

Рисунок 2 – Робот для работы в космосе

необходимость в высокой пропускной способности межмодульного интерфейса.

Модули взаимодействуют между собой и с одним или несколькими ЭВМ верхнего уровня с использованием специализированной пиринговой сети. Любой модуль может посылать пакеты данных другому модулю, что обеспечивает распределённое управление. Разработанные модули испытывались в различных конфигурациях: классический «змееподобный» манипулятор, робот с несколькими манипуляторами, шагающий робот с тремя или четырьмя шагающими движителями.

Благодаря простой структуре модулей, ориентированной на быстрое изготовление, внедрение новых функциональных модулей является простой и недорогой процедурой. Однако использование одноранговой сети, работа которой основана на принципе равноправия, представляется необоснованной, поскольку функционал модулей различен и, следовательно, модули неравноправны по существу. В данном случае модули могут выступать лишь в качестве источников информации (датчиков) и/или приёмниками простых команд и не обладают собственной системой управления.

Робот SMART [9] – это реконфигурируемая гетерогенная модульная робототехническая система, состоящая из набора взаимозаменяемых модулей. Основная задача разработки – создать модули, сохраняющие баланс между универсальностью, низкой стоимостью изготовления и функциональностью. Конструкция модулей предусматривает их быструю разработку и изготовление с минимумом экономических затрат. Архитектура системы формируется из модулей типа: *Модули*, *М-Роботы* и *Колонии*.

Модули – это базовые компоненты системы, подразделяющиеся на три основных типа: энергетические/управляющие модули (P/C-модули), шарнирные модули (J - joint) и специализированные модули (S - specialized). *М-Робот* – автономная система, в основе которой лежит как минимум один P/C-модуль и один или несколько J и S модулей. *Колония* – несколько М-Роботов, работающих совместно для выполнения какой-либо задачи.

P/C-модуль (питание/управление) выполняет управление всеми приводами других модулей, обрабатывает показания датчиков и контролирует обмен информацией между другими P/C-модулями и станцией управления. Модуль содержит в себе базовые электронные устройства, источник питания, периферийные средства коммуникации (CAN-шина, Bluetooth) и соединительные интерфейсы.

Система управления модуля построена на базе архитектуры «ведущий – ведомый» (master – slave). Соответственно имеется два типа ПО – для «ведущего» (master software – *Ms*) и «ведомого» (slave software – *Ss*). *Ms* контролирует внешнюю связь посредством Bluetooth и синхронизирует *Ss* внутри конфигурации робота. В М-Роботе *Ms* отвечает за предварительную обработку команд и их распределение между остальными *Ss* посредством CAN-шины. Информация, передаваемая внутри М-Робота, представлена в виде команд низкого уровня, например, указатели для контроля обратных связей по положению, данные для синхронизации, информация с датчиков и приводов. *Ss* получает сообщения через CAN-шину и выполняет желаемую команду низкого уровня.

Шарнирный модуль (J)представляет собой любой активный или пассивный привод вращательного, линейного (призматического), сферического типов и их комбинации. Модуль управляется P/C-модулем, от которого он также получает питание. J-модуль может содержать и управляющую электронику.

Специализированный модуль (S) предназначен для выполнения специфических задач: это может быть какой-либо особый датчик, который производит свою собственную обработку данных, специализированный инструмент или недорогие в производстве конструкции пассивных «конечностей» – нога, колесо, их гибрид, фланец или платформа как рабочий орган робота.

Для решения задач контроля конфигурации робота или робототехнической системы (*Колонии*) реализовано два типа связи между модулями – внутренняя (Intra-robot) и внешняя (Inter-robot). Связь Intra-robot объединяет те P/C-модули, которые включены в структуру одного и того же М-Робота, связь Inter-robot соединяет М-Робот со станцией управления. Два типа связи работают через CAN-шину и технологию Bluetooth соответственно.

Набор модулей предоставляет возможность создавать различные варианты робототехнических устройств. Обычный вариант М-Робота – автономное устройство, состоящее как минимум из одного P/C-модуля, J-модуля и S-модуля. Различные комбинации модулей позволяют устройству реконфигурироваться или само-реконфигурироваться.

Одна из важнейших особенностей робота SMART заключается в том, что каждый модуль может проектироваться как простое по структуре и конструкции устройство, недорогое в изготовлении, так и как комплексное, высокопроизводительное устройство со своей интеллектуальной составляющей.

Наиболее интересным и перспективным решением можно считать робот SMART. Однако использование в качестве коммуникационной среды CAN-шины и технологии Bluetooth ограничивает функциональные возможности робота из-за ограниченной пропускной способности этих каналов связи и

исключает возможность дистанционного или супервизорного управления роботом на больших расстояниях. Кроме того, структура ИИУС робота и интерфейсы взаимодействия модулей не позволяют использовать в качестве модулей разработки сторонних производителей, что снижает эффективность производства таких роботов.

Анализ рассмотренных примеров различных модульных гетерогенных робототехнических систем позволяет сделать вывод о том, что модульный принцип построения роботов в настоящее время является актуальным и перспективным.

Цель и задачи исследования

Предлагается в основу данного исследования положить функционально-модульный принцип организации ИИУС мобильного робота (МР). Сложность решения данной задачи заключается в том, что необходимо выделить функционально законченные части ИИУС мобильного робота – модули и разработать универсальные программные и аппаратные интерфейсы, позволяющие объединять модули в системы различного функционального назначения. Тогда возникает новое свойство – в зависимости от целевого назначения МР меняется его конфигурация за счёт соответствующей композиции различных модулей, которые являются самостоятельными функциональными элементами.

Мобильность системы усложняет решение данной задачи, поскольку для связи мобильной части с удалённой на большое расстояние системой управления (для вариантов дистанционного и супервизорного управления) используется радиоканал со всеми присущими ему недостатками.

Для решения поставленной задачи предлагается использовать новый подход – рассматривать ИИУС робототехнической системы как *локальную вычислительную сеть* (ЛВС) с мобильными узлами, и разработать соответствующее *сетевое программное обеспечение*, которое придаст системе такие свойства, как масштабируемость и реконфигурируемость [10]. Каждый узел ЛВС – это модульный мобильный робот, ИИУС которого также представляет собой ЛВС, узлы которой – это функциональные модули. Готовые модули, изготовленные на основе разработанного принципа, могут быть непосредственно использованы в других робототехнических системах.

Цель настоящего исследования заключается в разработке функционально-модульного принципа построения программно-аппаратной части гетерогенных мобильных робототехнических комплексов.

Задачи исследования.

- Разработать структуру ИИУС МР, позволяющую представить её как взаимодействие отдельных функционально законченных частей – модулей.
- Определить минимальный набор функционально законченных частей ИИУС МР с позиции их реализации в виде отдельных мехатронных и/или электронных модулей.
- Сформулировать функционал каждого модуля и определить требования к их конструкции, коммуникационным каналам и интерфейсам взаимодействия, как аппаратным, так и программным.
- Разработать универсальный программный интерфейс взаимодействия модулей, учитывающий возможность их модернизации без изменения функционала и возможность дистанционного динамического перепрограммирования их вычислительных устройств.
- Разработать структуру информационного взаимодействия модулей МР, обеспечивающую возможность масштабирования и реконфигурирования и её аппаратную реализацию.
- Разработать пользовательский интерфейс системы супервизорного управления модульным МР по каналам Интернет и радиоканалу.
- Разработать и изготовить лабораторный макет функционально-модульного мобильного робота, включающий сенсорную, исполнительную, управляющую, вычислительную, коммуникационную и программную части.
- Выполнить экспериментальное исследование эффективности предложенных решений и вариантов исполнения функциональных элементов.

Основные положения функционально-модульного принципа

Согласно концепции проекта выделяются следующие основные принципы построения информационно-измерительной и управляющей системы модульного МР:

1. Каждый *модуль* является функционально завершённым электронным или мехатронным устройством.
2. ИИУС робота строится как локальная вычислительная сеть, узлами которой являются *модули*.
3. Используется принцип распределённого управления.

4. При построении аппаратной части модулей используется принцип распределённого стабилизированного питания.
5. Каждый *модуль* снабжается соответствующим программным обеспечением – драйвером.

Функциональная завершённость модулей означает конструктивную и функциональную независимость, что позволит использовать модули сторонних производителей, идентичные по своим функциям заменяемым.

Сетевой принцип построения ИИУС придаёт роботу свойство реконфигурируемости и масштабируемости. Использование технологии Ethernet обеспечивает пропускную способность межмодульных коммуникационных каналов до 1000 Мбит/с и даёт возможность применять всё семейство протоколов TCP/IP и иные, широко используемые в Internet протоколы, и соответствующие библиотеки. Кроме того, появляется возможность использовать для дистанционного управления цифровые защищённые радиоканалы, например, стандарта Wi-Fi.

Принцип распределённого управления заключается в следующем. Каждый мехатронный или электронный модуль имеет собственную систему управления, реализованную на базе микроконтроллера, и, при необходимости, использующую собственную сенсорную систему и актуаторы. С помощью перечисленного набора элементов системы управления модуля реализуется его функциональная завершённость. Каждый модуль, в этом случае, может самостоятельно выполнять ограниченный набор функций, а внешняя (общая) система управления формирует локальную цель и определяет последовательность выполнения функций и передаёт в модуль лишь необходимые параметры команд, получая в ответ отчёт об их выполнении – формируется шлейф данных [11]. В результате весь вычислительный процесс, реализующий работу МР в целом, распараллеливается.

Принцип распределённого стабилизированного питания реализуется следующим образом. Общее нестабилизированное питание робота, включая электрические привода, осуществляется от отдельного модуля, содержащего аккумуляторные батареи (АКБ). При этом в каждый модуль устанавливается собственный блок формирования стабильных напряжений (БФСН), предназначенный для осуществления питания лишь внутримодульных устройств, например, микропроцессоров. На вход БФСН подаётся напряжение непосредственно от АКБ. При пульсациях входного напряжения, вызванных, например, пусковыми токами электродвигателей, наличие БФСН исключает возможное прерывание выполнения программного кода внутримодульными вычислительными устройствами. Кроме того, такое распределённое питание не накладывает ограничение на потребляемую мощность каждого модуля; требуется лишь ограничить суммарную мощность, потребляемую от АКБ всеми модулями. В случае же превышения суммарной мощности, достаточно лишь заменить один модуль, установив модуль с более ёмкими АКБ. Кроме того, выделяемое тепло распределяется между модулями, а не концентрируется в едином блоке питания, что потребовало бы установки радиаторов.

«*Концепция драйверов*» заключается в том, что для каждого мехатронного устройства создаётся унифицированный сетевой управляющий протокол на базе существующих низкоуровневых программных интерфейсов взаимодействия [12]. Тогда производитель может сравнительно просто интегрировать своё устройство в ИИУС модульного МР, создав лишь дополнительный драйвер, реализующий детерминированные протоколом программные инструкции управления и протоколы сетевого взаимодействия. При появлении в сети нового мехатронного устройства ПО центральной системы управления в процессе взаимодействия с драйвером автоматически включает это устройство в общую сеть. Наличие в каждом модуле вычислительного устройства и сетевой принцип построения ИИУС модульного МР дают возможность создать соответствующий драйвер для того или иного модуля с тем самым обеспечить включение в сетевую структуру ИИУС робота модулей сторонних производителей без переработки их низкоуровневого программного кода.

Заключение

Формирование структуры модульного МР выполняется из набора специальных модулей, тип, функция и количество которых зависит от целевого назначения робота. Разработанный в рамках настоящего проекта функционально-модульный принцип построения мобильных робототехнических систем позволит создавать универсальные модули, используя которые можно конструировать мобильные робототехнические комплексы различного назначения [13].

На рис. 3 приведены возможные варианты исполнения гетерогенного модульного МР. Колёсный робот вертикального исполнения с помощью несложной модернизации конструкции может быть преобразован в робот повышенной проходимости на гусеничном ходу или в робот горизонтального исполнения, конструктивно собранного из тех же модулей.

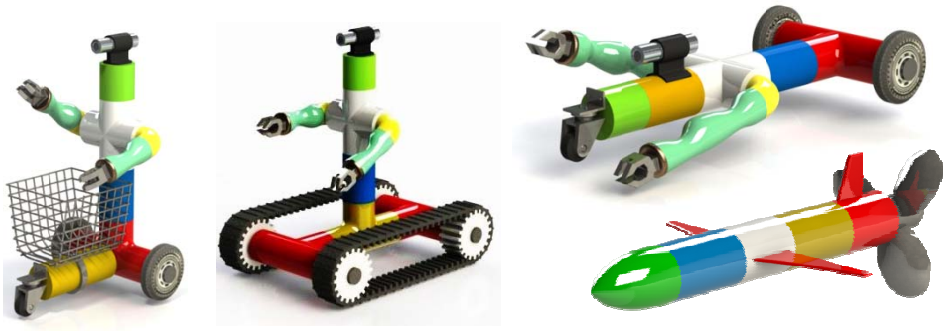


Рисунок 3 - Варианты исполнения гетерогенных модульных мобильных роботов (компьютерные модели)

Из функционально аналогичных модулей, но в ином конструктивном исполнении, может быть выполнен вариант подводного исследовательского робота, но корпуса его модулей выполнены из более прочного материала, выдерживающего высокое давление на больших глубинах.

Работа выполняется при частичной поддержке РФФИ: грант 16-07-00811а.

1. Fukuda T. A dynamically reconfigurable robotic system (concept of a system and optimal configurations) / T. Fukuda and S. Nakagawa // In Proceedings of IECON ’87: 1987 International Conference on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation, 1987.
2. M-TRAN: selfreconfigurable modular robotic system / S. Murata, E. Yoshida, A. Kamimura, H. Kurokawa, K. Tomita, and S. Kokaji // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 7(4):432–441, 2002.
3. Design of the ATRON lattice-based self-reconfigurable robot / E.H. Østergaard, K. Kassow, R. Beck, and H.H. Lund.// Autonomous Robots, 21(2):165–183, 2006.
4. Salemi B. SUPERBOT: A deployable, multi-functional, and modular self-reconfigurable robotic system / B. Salemi, M. Moll, and W.-M. Shen // In Proceedings, IEEE/RSJ Intl. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pages 3636–3641, Beijing, China, 2006.
5. Fitch R.C. Heterogenous Self-Reconfiguring Robotics / R.C. Fitch // PhD thesis, Dartmouth College, Hanover, New Hampshire, USA, 2004.
6. On sub-modularization and morphological heterogeneity in modular robotics / A.H. Lyder, K. Stoy, R.-F. Mendoza-Garcia, J.C. Larsen, and P. Hermansen // Intelligent Autonomous Systems 12, volume 193 of Advances in Intelligent Systems and Computing, pp. 649-661. Springer Berlin Heidelberg, 2013.
7. Lyder A. Mechanical design of ODIN, an extendable heterogeneous deformable modular robots / A. Lyder, R.F.M. Garcia, and K. Stoy // In Proceedings, IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems, ph.883–888, Nice, France, 2008.
8. Hancher M.D. A modular robotic system with applications to space exploration / Hancher M.D., Hornby G.S. // 2nd IEEE International Conference on Space Mission Challenges for Information Technology (SMC-IT'06). - Pasadena, CA: Publisher «IEEE», 2006. – P. 132 - 140.
9. Baca J. A heterogeneous modular robotic design for fast response to a diversity of tasks / J. Baca, M. Ferre, and R. Aracil // Robotics and Autonomous Systems, vol. 60, no. 4, pp. 522–531, 2012.
10. 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.
11. Андреев В.П. Разработка технологии межмодульного общения в гетерогенном модульном мобильном роботе / Андреев В.П., Плетенев П.Ф. // Экстремальная робототехника. Труды международной научно-технической конференции. – Санкт-Петербург, 2016. (настоящий сборник).
12. Андреев В.П. Территориально-распределённое многооператорное управление роботизированными системами с использованием сетевых технологий / Андреев В.П., Кирсанов К.Б., Подураев Ю.В. // Экстремальная робототехника. Труды международной научно-технической конференции. – Санкт-Петербург: Изд-во «Политехника-сервис», 2015. – С.71 – 76.
13. Андреев В.П. Разработка функциональных узлов гетерогенного модульного мобильного робота / Андреев В.П., Ким В.Л. // Экстремальная робототехника. Труды международной научно-технической конференции. – Санкт-Петербург, 2016. (настоящий сборник).

J. Artigas[1], C. Riecke[1], B. Weber[1], M. Stelzer[1], R. Balachandran[1], S. Schaetzle[1], R. Bayer[1], M. Steinmetz[1], J. Voegl[1], B. Brunner[1], A. Albu-Schaeffer[1], M. Guk[2],V. Zaborovskyi[3], A. Kondratiev[2], V. Muliukha[2], A. Silinenko[2], O. Shmakov[2]

FORCE-FEEDBACK TELEOPERATION OF ON-GROUND ROBOTS FROM THE INTERNATIONAL SPACE STATION IN THE FRAME OF THE «KONTUR-2» EXPERIMENT

[1]DLR, Oberpfaffenhofen, Germany,[2]CRDI RTC, Saint-Petersburg, Russia, [3]SPbPU, Saint-Petersburg, Russia
Jordi.Artigas@dlr.de, Cornelia.Riecke@dlr.de, Bernhard.Weber@dlr.de, vlad@neva.ru, kondr@rtc.ru, m.gook@rtc.ru, v.muliukha@rtc.ru, avs@rtc.ru, shmakov@rtc.ru

Abstract

The issues on creation and using of the haptic interface for remote control of on-ground robots from the Russian Segment of the International Space Station (ISS RS) in the frame of «KONTUR-2» space experiment are presented. Force-feedback as key technology of this system ensures elements of telepresence of operator in the environment where robot operates using visual and tactile feedback in a closed control loop. Results of space sessions on control of on-ground robots from the ISS RS are presented.

Keywords: space experiment, telepresence, force-feedback, time delay, teleoperation.

Introduction

«KONTUR-2»is a joint space experiment for the in-flight verification of force feedback and telepresence technologies between the German Aerospace Center (DLR), ROSKOSMOS, the Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics (RTC) and RSC Energia. This mission follows after successful collaboration of these organizations in previous space experiments [1, 2]. The main objectives of "KONTUR-2" are the implementation and evaluation of telerobotics and telepresence technologies for space telemanipulation applications. To that end, a force feedback joystick was built at the DLR and installed in the Russian segment of ISS in August 2015 and a bilateral controller was designed to cope with the communication latencies between ISS and ground station on Earth [4]. Both, DLR and RTC conducted several experiments during 2015 in which two cosmonauts successfully teleoperated the robots on ground at DLR and RTC from the ISS. Figure 1 shows the general mission setup, including the infrastructure used for the cosmonaut training at Gagarin Research and Test Cosmonaut Training Center (GCTC).

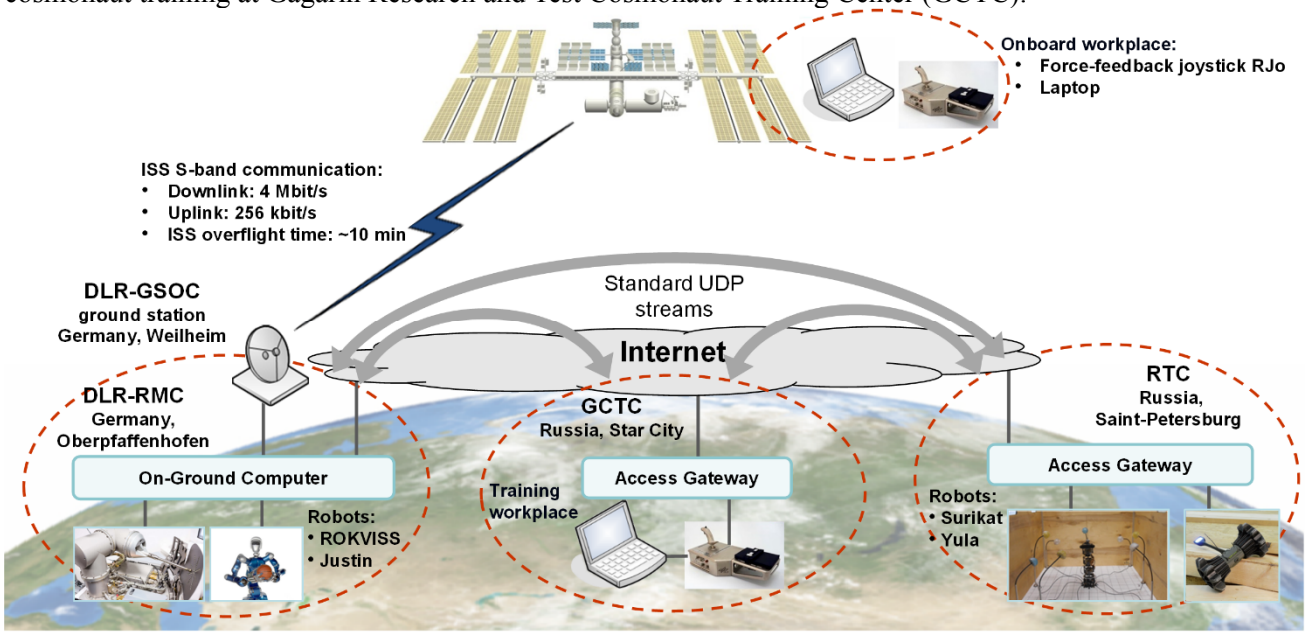


Figure 1 – Space experiment setup

The joystick was designed according to a set of performance requirements and space related specifications needed for inflight operation onboard the ISS. Its materials, thermal design, motors and electronics have been developed to fulfill the required space qualification.

The S-Band antenna for real-time communication designed for the ROKVISS experiment [1] was used to communicate both, force-feedback joystick and robots on Earth. The types of data transmitted between both, space operator (cosmonaut) and the robot on Earth are shown in Figure 2. Haptic, visual and voice signals helped the

cosmonaut to immerse in the remote Earth environment and to feel tele-present on Earth through the robotic system.

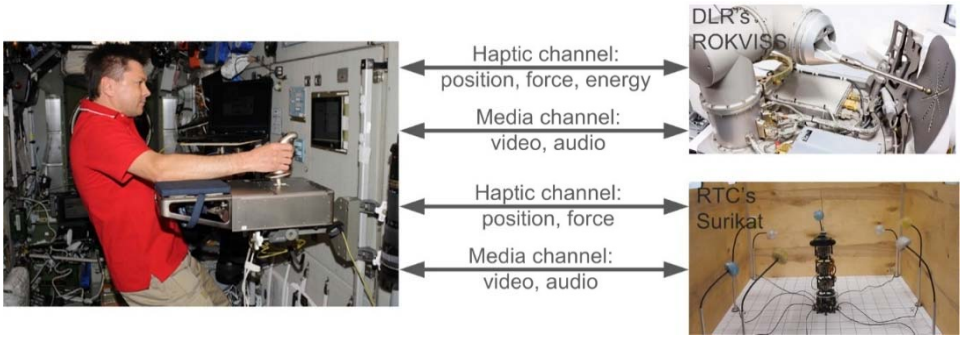


Figure 2 – Telepresence data streams

Real time, communication and control requirements

It is well known in robotics, and in particular in the control field, that closed loops systems that include non-negligible time delays can produce negative effects on system stability. This issue is magnified in those closed loop systems that are characterized by tight couplings, that is, where high frequency control actions are required to capture a reasonable spectrum of the dynamics of the controlled system. For instance, in order to capture the interaction of a robot's end-effector while contacting a hard surface, a well established control-loop frequency is 1000Hz. In particular, the control loop frequency of the joystick is as well 1000Hz. However, due to the limitations of the communication link, the transmission frequency through the S-Band link is 500Hz for DLR mission. Arguably, the lower transmission frequency limits the overall control loop bandwidth. Nevertheless, it can be proved that keeping higher local control loop frequencies at the joystick or robot sides has some control and performance benefits. For instance, higher virtual damping values can be achieved or more accurate passivity observers resulting in better bilateral control performance. On the other hand, coping with latencies between master and slave systems can be challenging, especially when delay is non-constant and jitter and data losses are present.

In «KONTUR-2», two scenarios had to be considered in the design of the bilateral controller: ISS and training. The first is the nominal mission case, where the cosmonaut controls the robot from the ISS through the S-band link. The second one is a geographically distributed scenario through the internet for cosmonaut training purposes. Since the exact same system needs to operate in both, the requirements for the bilateral controller are clearly strengthened as both links are characterized by different communication parameters.

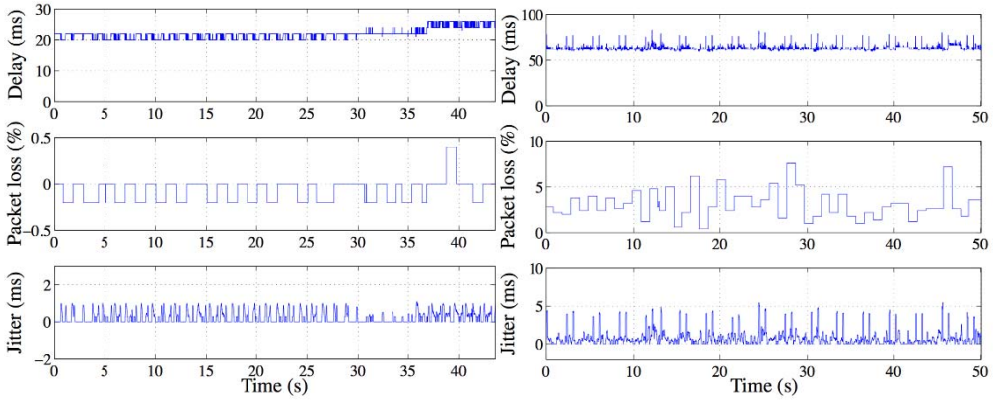


Figure 3 – S-baand link (left) and training setup (right) round delay measurements (DLR mission)

Figure 3 shows round trip delay measurement in both scenarios. As it can be seen, the nature of these two links is quite different in terms of time delay, data losses and jitter. The time delay for the ISS communication varied from 20 to 30 ms (corresponding to azimuth and horizon points) with mean negligible data losses. The internet training setup introduced a mean delay of 65 ms between Star City and Oberpfaffenhofen (where the DLR is located) and highly oscillating package loss ratio, from 5% to 15%, due to the UDP protocol. Though more limited in bandwidth, the ISS link is higher in performance. However, shadowing can occur resulting in signal attenuation and in turn higher package loss ratios or even communication blackouts. On the other hand, the internet link measurements confirm a typical UDP behavior.

DLR Experiment

The DLR experiment consisted in controlling the ROKVISS arm (see Figure 2)

locatted in one of the laboratories in Oberpfaffenhofen. Two types of tasks were conducted to evaluate the perform nce of the teleoperation system: 1) Free movement tasks, without contacts between the robot and the task board and 2) contact tasks with different haptic goals [5, 6]. During the free movement tasks we investigated the positional accuracy when controlling the telerobotic system from the ISS. During contact tasks, the accuracy of the force reflection was evaluated.

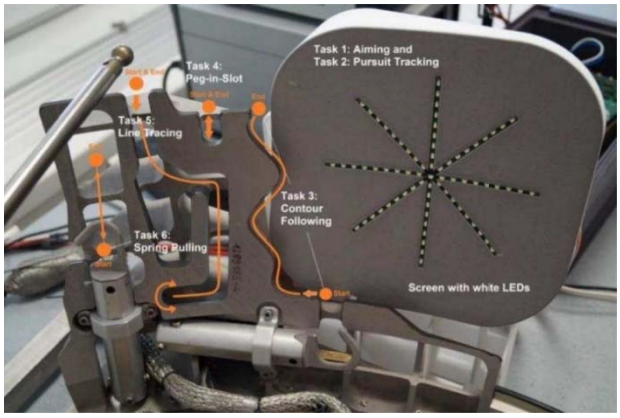


Figure 4 – Task booard for evaluating the performance of the telerobotics system

To that end, the robot arm interacted with a task board which included several tasks, from pure trajectory following in free space to peg-in-slot, contour following or hard surface contacts with different force controller settings (see Figure 4). At each experimental session, the cosmonaut was asked to perform different tasks. Position and force signals were registered in both, joystick and slave robot systems.

The approach for the bilateral controller is based on a 4-Channels architecture, whose stability in the presence of time delay, jitter and data losses is addressed through the Time Domain Passivity Control Approach (TDPA) [4] and the Time Delay Power Network (TDPN) representation. In this architecture, position and force signals are sent from the joystick to the ROKVISS robot and computed and measured force signals are sent in the other direction. Both systems, the joystick and ROKVISS, are impedance controlled, i.e. the commanded signals to the joystick and to the robot are forces, and their outputs are positions. Interestingly enough, the same controller parameters were used in both described scenarios, that is, mission (ISS S-Band link) and training (internet DLR – GCTC). Indeed, one of the most interesting features of this controller is its adaptability to any communication conditions, including different delay values, jitters and package losses.

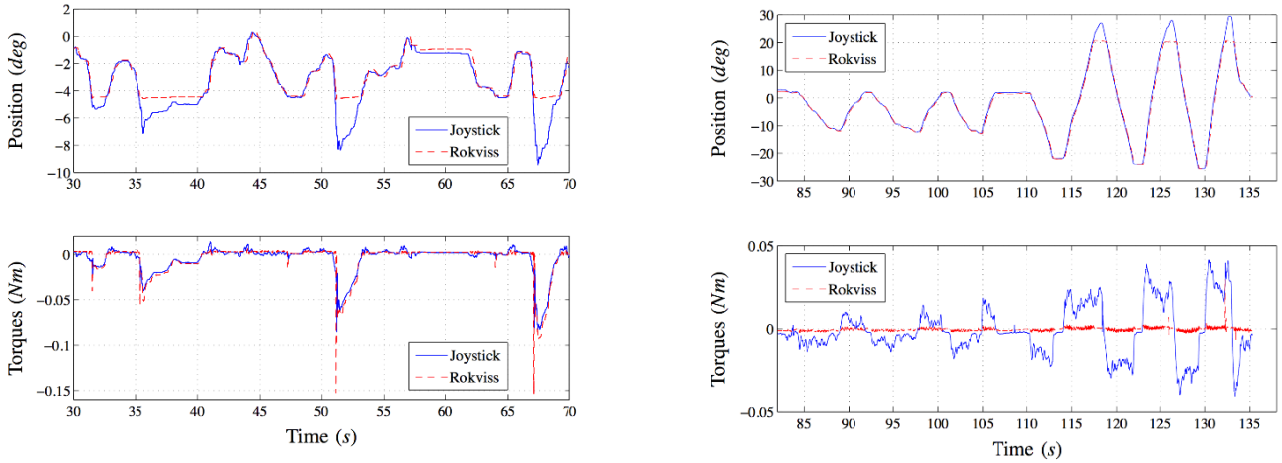


Figure 5 – Position and force signals during one experimental session. Left: performance in hard contact situations. Right: performance in free space motion

Figure 3 shows the results of an experiment session conducted during August 25th 2015 with cosmonaut Mr. Kononenko. These plots show the position tracking and the force feedback performance during rigid contact situations and for free environment respectively. The rigid contact and free environment motion during the cosmonaut training that took place at GCTC in Star City (joystick) and the DLR (ROKVISS robot), are shown in Figure 4.

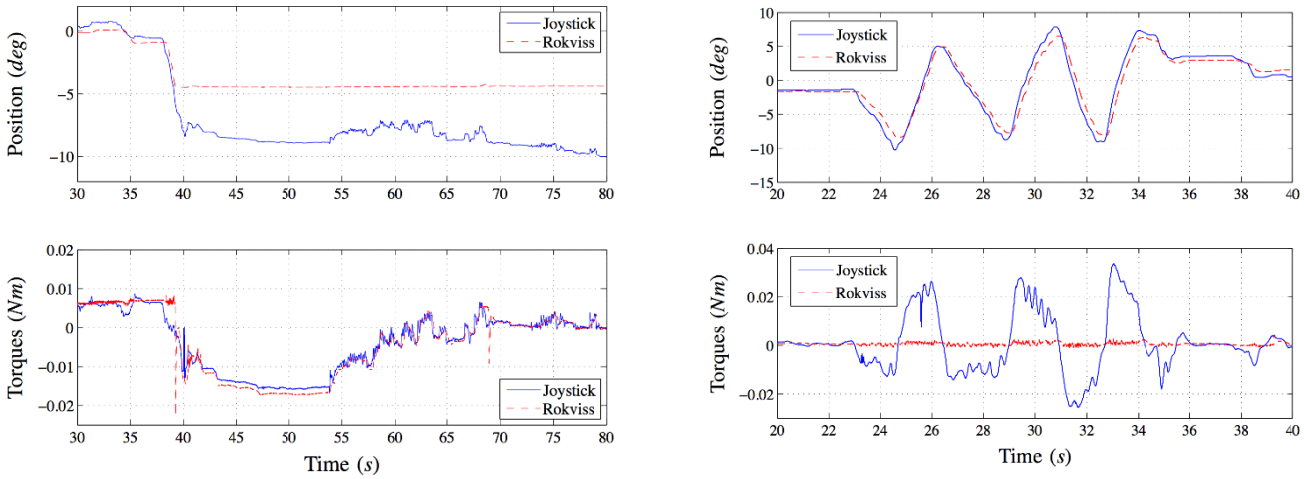


Figure 6– Performmance during the training between DLR and GCTC. Left: performance in hard contact situations. Right: Performance in free space motion

The experiments with the joystick on board the ISS proved that all hard- and software components of joystick as well as the telepresence system are functioning reliably. The joystick is able to provide stable and reliable force feedback performance thanks to its fast real time interface and low intrinsic latencies. These hardware and software components have been validated in the space mission "KONTUR-2". The participating cosmonauts, Oleg Kononenko and Sergey Volkov, were able to perform the experimental tasks with the ROKVISS robot, located in the DLR in Oberpfaffenhofen (Germany) from the Russian Segment of the ISS. Force-feedback and latency compensation technologies for bilateral control were successfully evaluated [3]. The cosmonauts reported that the tasks were easy to perform with the force feedback joystick. Different telepresence approaches were compared in terms of system and operator performance and the results from terrestrial and space sessions were compared to understand better the effects of microgravity on sensorimotor performance while controlling a telerobotic system. Preliminary analyses revealed that positional accuracy is degraded in microgravity compared to terrestrial conditions. Yet, these performance losses can partially be compensated by implementing a movement damping at the joystick. One of the most interesting features of the bilateral control approach based on the Time Domain Passivity Approach is that a system tuned for a setting close to ideal can operate in the ISS communication conditions and the internet training setup with guaranteed stability.

RTC Experiment

During first part of RTC experiment cosmonauts from onboard the RS ISS controlled cinematically redundant manipulator Surikat which equipped stylus and light targets located around (see Figure 2) [7, 8]. Targets lighted up for a short time and the cosmonaut had to extinguish the target, touching it by the stylus. Unlike DLR's robot Surikat didn't have torque sensors so force feedback on the joystick handle reflected the current position of the robot so that operator cannot move the handle faster than the robot has reached already specified position taking into account the delay and inertia of the robot.

Unlike DLR experiment during RTC control sessions connection to the ISS took place not only via S-band link, but also through the Internet (see Figure 1). This imposes additional restrictions on the control system, such as increased delays, a high percentage of packet loss and higher jitter as showed above. Nevertheless established telecommunication infrastructure provides transmission of heterogeneous traffic with an acceptable quality of service for each of the control channels, and feedback. The most critical to latency and bandwidth bi-directional control channel provided total transmission delay for the control and feedback loop (RTT) about 85 ms. Figure 7 shows graphs of RTT for RTC sessions. The graph shows the change of RTT during the sessions which is connected to change in distance between ISS and ground station.

Established control system provided manual teleoperation from the ISS RS of robots located on Earth. Operator onboard the ISS RS receives feedback from the robot through several channels:

- Tactile feedback provided by transfer of information between robot and joystick drives controllers. Minimum delay of this type of feedback is provided by operation of controllers in real time and transmit this information flow via priority channel in S-band link. This type of feedback provided to the operator a tactile information about the inertia of the system in the absence of a torque sensor on the robot;

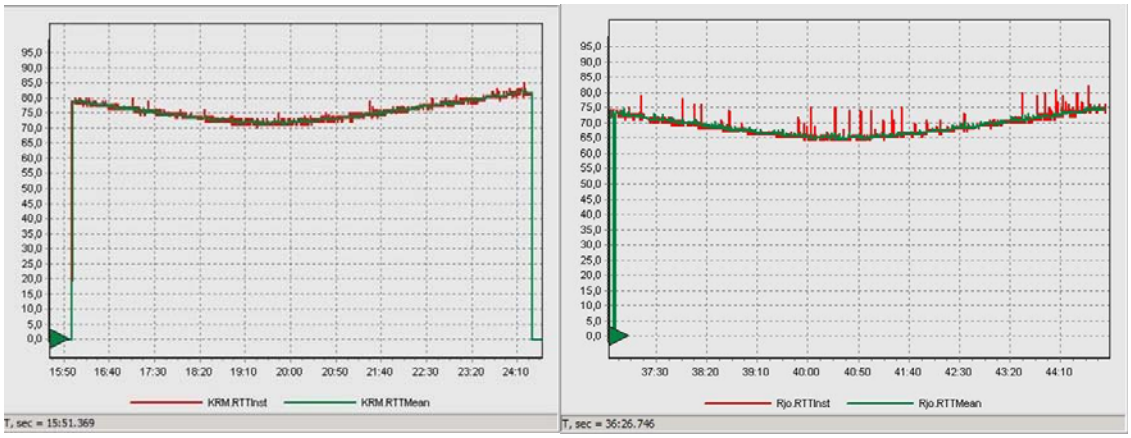


Figure 7 – RTT between the ISS and RTC during two different sessions

- Visual feedback, obtained by translation of the video from a camera mounted on the robot, or from the observation camera. For this type of feedback it was defined the balance between the quality of the transmitted image, the frequency of its update and delay in delivery when there are significant limitations on the bandwidth of the communication channel (256 kbit/s for upload). In connection with the need to use data compression algorithms, this kind of feedback provided an appreciable delay due to data processing at the transmitting and receiving sides;
- Visual feedback, obtained by visualization of the robot's 3D-model motion on the laptop. During control of Surikat for animation of 3D-model it was used telemetric information from the robot; this information was delivered in the priority channel, which provided low delays in display. Compactness of transmission data allowed for a low bandwidth to provide higher image refresh rate (compared to video), which significantly improves the dynamic picture representations of the surrounding area.

The effectiveness of combination of several types of feedback – haptic (force in the handle of RJo) and visual (video and 3D-model) – complement each other to provide a virtual "immersion" of operator to the environment of the robot operation, confirmed the successful implementation of manipulation and locomotion tasks carried out during teleoperation sessions.

Force feedback joystick was used in the experiment as part of different teleoperation systems for control heterogeneous robots. Software architecture allowed to choose the controller of RJo depending on the current session (DLR or RTC) and to change dynamically its settings during a session.

For teleoperation of RTC Surikat robot it was used dual-channel architecture with controllers, designed in RTC: the information about current position transmitted between RJo and the robot. RJo controller allowed to implement a virtual spring on the handle, which bind the position of the RJo handle and robot. Furthermore, it provided sensitive of virtual mass and viscosity. The insertion of force feedback to control of the robot which doesn't have force-torque sensors, yielding positive results in the form of increased speed and accuracy of operations. Figure 8 shows the trajectory of RJo and Surikat in the absence and presence of force feedback while performing the same tasks in experiment session.

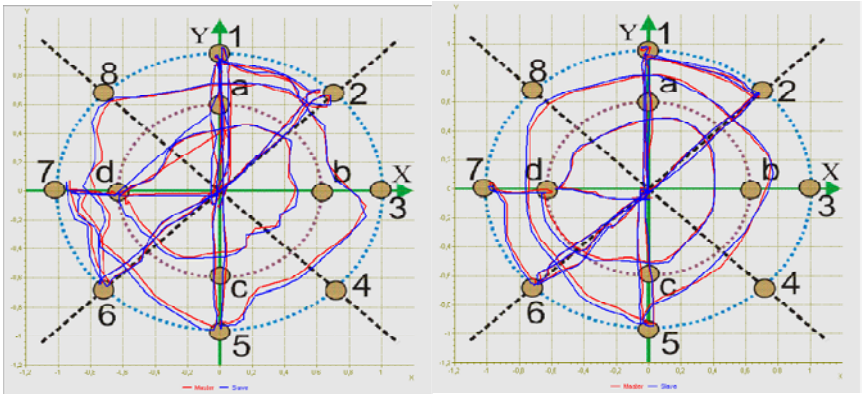


Figure 8 – Trajectory of RJo's handle (Master) and Surikat (Slave) in the absence (left) and presence (right) of force feedback

Universal telerobotics system

Teleoperation system with force-feedback joystick originally developed for the two robots (ROKVISS and Surikat) with the corresponding controllers of DLR and RTC, after the success of a series of sessions,

was later used to control other robots. Small mobile robot Yula (RTC), in contrast to Surikat required position-speed control: the operator controls the direction of motion, rather than the position of the robot. The Yula robot has not special sensors like radar. The model-based force feedback system was used in this experiment. Cosmonaut saw a 2D-model of the polygon with a robot, obstacles and borders and video from the robot's camera. Force feedback was calculated according the distance from the robot to obstacles. The task for the cosmonaut was to move the robot through the labyrinth. In this case force-feedback of joystick helped cosmonaut did not run into obstacles.

During teleoperation of anthropomorphic robot Justin located in DLR fixed mapping of the two coordinates of RJo onto two joints of robot's arms was used, and the mini-joystick (four-position switch on the handle of RJo) was used to control of the movement of the head with a built-in camera. Two space-separated RJos was used for cooperative control of Justin arms: operator from onboard of the ISS RS controlled right arm, operator in RTC controlled left arm of the robot. Justin controlled simultaneously from the ISS RS and RTC, took the ball by two arms and manipulated them according to the instructions of coordinator stayed in front of the robot (see Figure 9).

Thus, versatility of the developed teleoperation system was demonstrated. This system allows to use the 2-DOF force-feedback joystick for teleoperation of robots which are different in purpose, number of DOF and kinematic schemes.

Figure 9 – Russian cosmonauts Oleg Kononenko during space sessions of «KONTUR-2» with the robot

«Justin» (translated at the he XI International Scientific and Practical Conference «Manned Space Flights»)

Main results of «KONTUR-2» experiment

23 space sessions were held from August to December 2015:

- 9 sessions of teleoperation of DLR robot ROKVISS;
- 4 sessions of teleoperation of RTC robot Surikat;
- 5 sessions of teleoperation of RTC robot Yula;
- 5 sessions of cooperative DLR/RTC teleoperation of anthropomorphic robot Justin.

Figure 10 – Russian cosmonauts during space sessions of «KONTUR-2» experiment: Oleg Kononenko (left), Sergey Volkov (right)

Figure 10 shows photos of Russian cosmonauts onboard the ISS during the performing of tasks in the framework of «KONTUR-2» experiment. Video translation from the ISS and audio dialog with a cosmonaut was established via s-band and internet communications.

During «KONTUR-2» experiment the following world achievements in the field of teleoperation from the ISS RS of terrestrial robots using 2-DOF force-feedback joystick have been established:

- August 2015: high fidelity teleoperation (DLR robot ROKVISS);
- August 2015: teleoperation of manipulator from the ISS via Internet (RTC robot Surikat);
- October 2015: teleoperation of the mobile robot from the ISS via the Internet (RTC robot Yula);
- November 2015: teleoperation of anthropomorphic robot from the ISS (DLR robot Justin);
- November 2015: cooperative teleoperation of anthropomorphic robot from the ISS and from remote workplace via Internet (robot Justin, DLR/RTC).

The main scientific and technical results of sessions are:

- Dual-channel (RTC), and four-channel (DLR) system for teleoperation of on-ground robots from the ISS RS;
- Verified parameters of models of teleoperation systems of DLR and RTC, providing tactile feedback and stability of the system with delays in the control loop up to 85 ms;
- Confirmation of feasibility of using of force-feedback joystick for teleoperation of robotics in microgravity conditions;
- Proof of efficacy of combination of tactile and visual feedback in a control loop, which includes a human operator working in microgravity;
- Confirmation of suitability of a heterogeneous distributed telecommunications system as the infrastructure for remote control of on-ground robotic from onboard the ISS RS;
- Confirmation of suitability of developed system for remote control of robots, which are different in purposes, number of DOFs and kinematic schemes, from 2-DOF RJo.

Conclusion

Scientific and technical tasks of creating of force-feedback teleoperation system for control of on-ground robots from the ISS has been successfully solved within the frame of «KONTUR-2» experiment. The network infrastructure for verification of such a distributed teleoperation systems has been created. For the first time the teleoperation sessions from onboard the ISS of on-ground robots with help of force-feedback joystick were held. Developed technologies are intended for using in space robotic systems during realization of planetary and orbital missions.

1. ROKVISS – robotics component verification on ISS current experimental results on parameter identification / A. Albu-Schaeffer, W. Bertleff, B. Rebele, B. Schaefer, K. Landzettel, G. Hirzinger // IEEE International Conference Robotics and Automation. – 2006. – P. 3879-3885.
2. «KONTUR» experiment on Russian Segment of the ISS / K. Landzettel, V. Zaborovskyi, E.Babkin, M. Belyaev, A. Kondratiev, A. Silinenko / Scientific Readings in Memory of K.E. Tsiolkovsky, Kaluga. – 2009 – Access mode: http://readings.gmik.ru/lecture/2009-EKSPERIMENT-KONTUR-NA-ROSSIYSKOM-SEGMENTE-MKS, free.
3. J. Artigas, R. Balachandran, M. Stelzer, B. Weber, J.-H. Ryu, C. Riecke, and A. Albu-Schaeffer, KONTUR-2: Force-feedback Teleoperation from the International Space Station," in Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA 2016.
4. J. Artigas, J. Ryu, C. Preusche, and G. Hirzinger, «Network representation and passivity of delayed teleoperation systems», in IROS, pp. 177–183, IEEE, 2011.
5. B. Weber, S. Schaetzle, C. Riecke, B. Brunner, S. Tarassenko, J. Artigas, R. Balachandran, and A. Albu-Schffer, «Weight and weightlessness effects on sensorimotor performance during manual tracking», in print, accepted for EuroHaptics, 2016.
6. Riecke, C., Artigas, J. Balachandran, R., Bayer, R., Beyer, A., Brunner, B., Buchner, H., Gumpert, T., Gruber, R., Hacker, F., Landzettel, K., Plank, G., Schätzle, S., Sedlmayr, H.-J., Seitz, N., Steinmetz, B.-M., Stelzer, M., Vogel, J., Weber, B., Willberg, B., Albu-Schäffer, A.: KONTUR-2 mission: the DLR force feedback joystick for space telemanipulation from the ISS. In: Proceedings of i-SAIRAS 2016, Peking, China (2016)
7. «Kontur-2» – joint German-Russian space experiment on force-feedback control of on-ground robots from onboard the ISS / M. Guk, A. Silinenko // Proceedings of international scientific and technical conference «Extreme Robotics», 2014 October 1-2, Saint-Petersburg, «Polytechnica-service», 2014. – Pp. 59-64.
8. Teleoperation of on-ground robots from onboard the ISS in frame of «Kontur-2» space experiment / V. Zaborovskiy, M. Guk, V. Mulyukha, A. Silinenko, O. Volkov, M. Belyaev // Proceedings of international scientific and practice conference «Scientific exploration and experiments on the ISS», 2015, April, 9-11, Moscow, IKI RAS, 2015. – pp. 64-65.

Дж. Артигас[1], Ц. Райке[1], Б. Вебер[1], М. Штельцер[1], Р. Балачандран[1], С. Шаетцл[1], Р. Баер[1], М. Штеймец[1], Дж. Вогель[1], Б. Брюнер[1], А. Албу-Шафер[1], М. Гук[2], В. Заборовский[3], А. Кондратьев[2], В. Мулюха[2], А. Силиненко[2], О. Шмаков[2]

ТЕЛЕУПРАВЛЕНИЕ НАЗЕМНЫМ РОБОТОМ С СИЛОМОМЕНТНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ С БОРТА МЕЖДУНАРОДНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ В РАМКАХ КОСМИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА «КОНТУР-2»

[1]Германский центр авиации и космонавтики (DLR), Германия, [2]ГНЦ РФ ЦНИИ РТК
[3]СПбПУ, Санкт-Петербург, Россия
Jordi.Artigas@dlr.de, Cornelia.Riecke@dlr.de, Bernhard.Weber@dlr.de,
vlad@neva.ru, kondr@rtc.ru, m.gook@rtc.ru, v.muliukha@rtc.ru, avs@rtc.ru, shmakov@rtc.ru

Аннотация

В работе рассмотрены вопросы по созданию и использованию тактильной интерфейса для удаленного управления наземными роботами с Российского Сегмента Международной Космической Станции (РС МКС) в рамках космического эксперимента «Контур-2». Силамоментная обратная связь, являясь ключевой технологии этой системы, обеспечивает элементы телеприсутствия оператора в среде, где функционирует робот, с помощью визуальной и тактильной обратной связи в замкнутом контуре управления. Представлены результаты сессий космического эксперимента по управлению наземными роботами с РС МКС.

Ключевые слова: космический эксперимент, телеприсутствие, силомоментная обратная связь, временная задержка, телеуправление.

Введение

«Контур-2» – совместный космический эксперимент Роскосмоса, Германского аэрокосмического центра (DLR), ЦНИИ РТК и РКК «Энергия», посвященный верификации технологий телеприсутствия и силомоментного управления наземными роботами с борта РС МКС. Данный проект стал очередным этапом многолетней успешной кооперации этих организаций [1,2]. Основной целью эксперимента «Контур-2» являлась реализация и отработка технологий телеприсутствия и удаленного управления напланетными роботами с борта пилотируемого орбитального комплекса. Для этого DLR был разработан силомоментный джойстик, который был доставлен на РС МКС в августе 2015 года. Также DLR и ЦНИИ РТК разработали встроенные в джойстик программные контроллеры, позволяющие компенсировать временные задержки в канале передачи данных между МКС и Землей [4].В течение второй половины 2015 года DLR и ЦНИИ РТК провели сеансы управления, в которых российские космонавты успешно управляли с РС МКС роботами, расположенными в Германии и России. На рисунке 1 представлена обобщенная схема проведения эксперимента, включая инфраструктуру для тренировки космонавтов, развернутую в Центре подготовки космонавтов имени Ю.А. Гагарина (ЦПК).

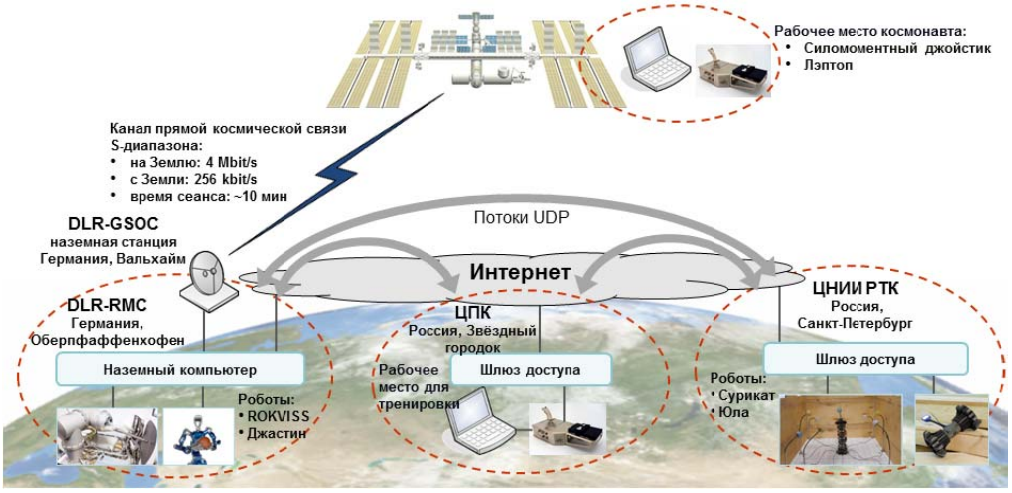


Рисунок 1 –Схема космического эксперимента «Контур-2»

Силомоментный джойстик был разработан в соответствии с требованиями к устройствам космического назначения, эксплуатирующимся внутри МКС. Материалы, использованные в джойстике, термическая конструкция, двигатели и электроника были разработаны и подобраны таким образом, чтобы удовлетворить требования космической квалификации, что было подтверждено соответствующими испытаниями.

Для связи между джойстиком на РС МКС и роботами на Земле использовался канал S-диапазона, разработанный во время реализации эксперимента ROKVISS [1]. Типы информационных потоков между космонавтом-оператором и наземными роботами представлены на рисунке 2. Тактильная, визуальная и аудио информация помогали космонавту погрузиться в удаленную наземную среду, окружающую робота, обеспечивая, таким образом, телеприсутствие с использованием робототехнической системы.

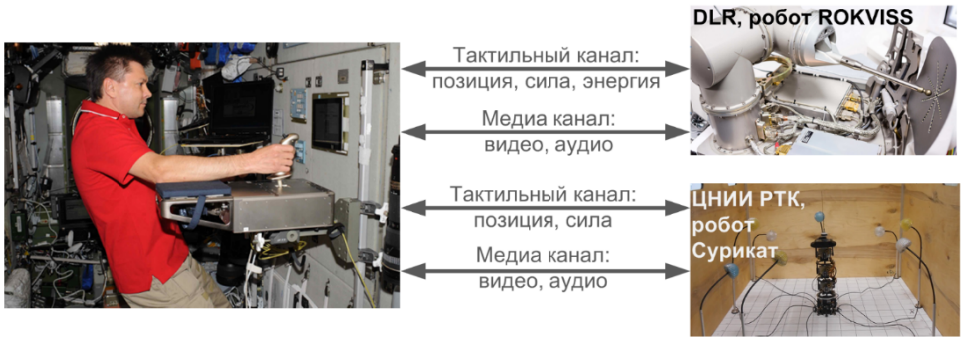


Рисунок 2 –Потоки данных во время сеанса управления

Требования к коммуникациям, управлению и режиму реального времени

В робототехнике, и, в частности, в области управления хорошо известно, что замкнутые системы с обратной связью и существенной временной задержкой могут оказывать негативное воздействие на стабильность системы в целом. Эта проблема усугубляется в тех замкнутых контурах обратной связи, которые имеют дело с контактными операциями, то есть, где необходимы управляющие воздействия высокой частоты, чтобы охватить спектр динамики управляемой системы. Например, для того, чтобы отразить процессы, происходящие при контакте оконечного устройства робота с твердой поверхностью, необходимо установить частоту контура управления порядка 1000 Гц. В частности, частота контура управления задающего манипулятора (джойстика), разработанного для эксперимента «Контур-2», составляет 1000 Гц. Тем не менее, из-за ограничений, накладываемых линией связи, частота передачи данных через канал связи S-диапазона составляет 500 Гц. Таким образом, более низкая частота передачи ограничивает пропускную способность контура управления в целом. Тем не менее, можно доказать, что сохранение более высоких частот локальных контуров управления на задающем манипуляторе и на стороне робота имеет некоторые преимущества с точки зрения управления.

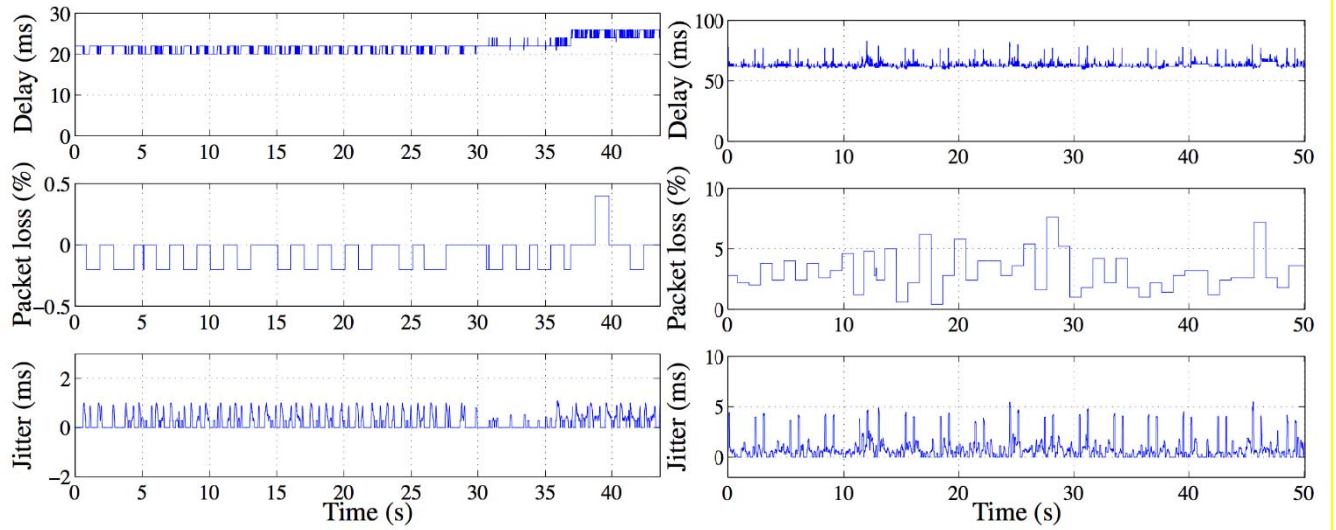


Рисунок 3 – Измерения качества канала связи. Слева: во время сеансов эксперимента. Справа: вовремятренировоккосмонавтов, находящихсявЦПК

Например, можно получить более высокие значения для виртуального демпфирования или более точные измерения пассивности, что приводит к улучшению качества управления. С другой стороны, компенсация задержек между задающим устройством и ведомой системой является сложной задачей, особенно при условии, когда математическое ожидание и дисперсия задержки не постоянные, а также присутствуют потери данных.

В эксперименте«Контур-2»реализовано два сценария работы двустороннего контроллера: управление с борта МКС и проведение обучения. Первый – это штатныйсеанс, в котором космонавт управляет роботом с борта МКС по каналу связиS-диапазона. Второй – географически распределенный сценарий управления через сеть Интернет с целью подготовки космонавтов. Так как одна и та же система должна работать в обоих сценариях, то требования, предъявляемые к двустороннему контроллеру,были ужесточены, поскольку каналы связи характеризуются различными значениями коммуникационных параметров.

На рисунке 3 показано измерение качества каналов связи в обоих сценариях. Как показано на рисунке, природа этих двух каналов связи довольно сильно отличается с точки зрения времени задержки, потери данных и значения джиттера. Задержка передачи данных в сеансах с МКС варьировалась от 20 до 30 мс (в зависимости от положения МКС над горизонтом) с пренебрежимо малыми потерями данных. Сеанс интернет-обученияобладал средней задержкой в 65 мс между Звездным городком и Оберпфаффенхофеном (где находится DLR) и высоким значениемпотерь пакетов, в диапазоне от 5% до 15%, в связи с использованиемUDP протокола. Таким образом, являясь более ограниченной в пропускной способности, связь с МКС тем не менее является более производительной. Однако в результате затенение антенны может произойти ослабление сигнала и, в свою очередь,возрастает вероятность потери пакетов или даже потери связи. С другой стороны данные измеренийсостояния канала связи с Интернетом подтверждают типичное поведение UDP.

Эксперимент DLR

Эксперимент DLR заключается в управлениироботом ROKVISS (см. рисунок 4), который расположен в одной из лабораторий DLRв Оберпфаффенхофене. Для оценки производительности системы телеуправления были реализованы две задачи: 1) свободное перемещение, без контактов между роботом и элементами стенда; 2) контактные задачи с различными целями очувствления [5, 6]. Во время задачи свободного движения исследуется позиционная точность системы телеприсутствия при управлении с борта МКС. Во время контактных задачоценивалась точность и четкость контактных операций.

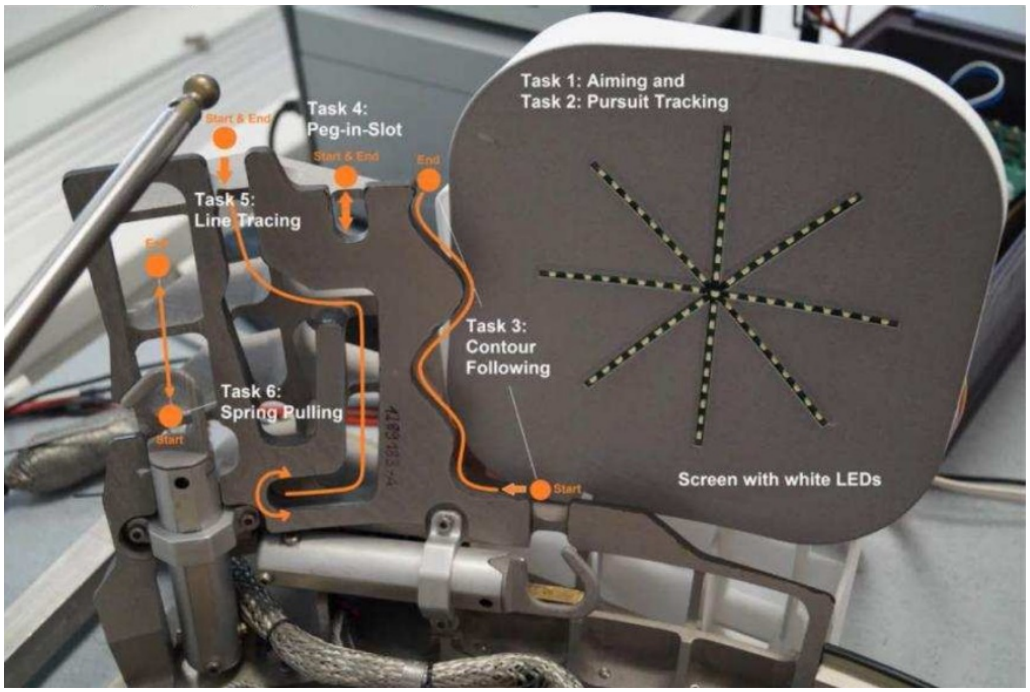


Рисунок 4 – Панель заданий для оценки эффективности работы системы телеуправления

Для этого рука робота взаимодействовала с элементамиспециальной платы стенда, решая несколько задач, от простого следования по траектории в свободном пространстве до решения задачи попадания концом манипулятора в специализированное место на панели стенда, движения вдоль контура или выполнения жестких контактных операцийс различными элементами стенда (см. рисунок 4). В рамках каждого сеанса эксперимента космонавтам было предложено выполнить различные задания. Позиционные и силомоментныеданные регистрировались как на задающем манипуляторе, так и на ведомой системе робота.

Двусторонний контроллер базируется на четырехканальной архитектуре, чья стабильность при наличиивременной задержки, джиттера и потери данных рассматривается в рамках подхода контроля пассивности (TDPA) [4] и представлениясети временных задержек (TDPN). В представленной архитектуре положение и силовые сигналы передаются от задающего манипулятора на робот ROKVISS, а вычисленные и измеренные сигналысилы посылаются в обратном направлении. Обе системы, джойстик и ROKVISS, управляются независимо, т.е. на вход джойстика и робота подается сила, а на выходе получается позиция. Необходимо отметить, что одни и те же параметры контроллера использовались в обоих описанных сценариях, то есть в космических сеансах (с борта МКС по каналу S-диапазона) и в процессе обучения (по каналам сети Интернет между DLR и ЦПК). Таким образом, одной из самых интересных особенностей данного контроллера является его адаптивность к любым условиям связи, включая различные значения задержки, джиттера и доле потерянных пакетов.

На рисунке 5 показаны результаты эксперимента, проведенного в ходе сессии 25 августа 2015 года с космонавтом Олегом Дмитриевичем Кононенко. Эти графики показывают положение и силу в контуре обратной связи во время жестких контактных операций и для свободного движения соответственно. Результаты измерений в процессе жестких контактных операций и свободного перемещения во время сеансов подготовки космонавтов в ЦПК в Звездном городке (джойстик) и DLR (робот ROKVISS), показаны на рисунке 6.

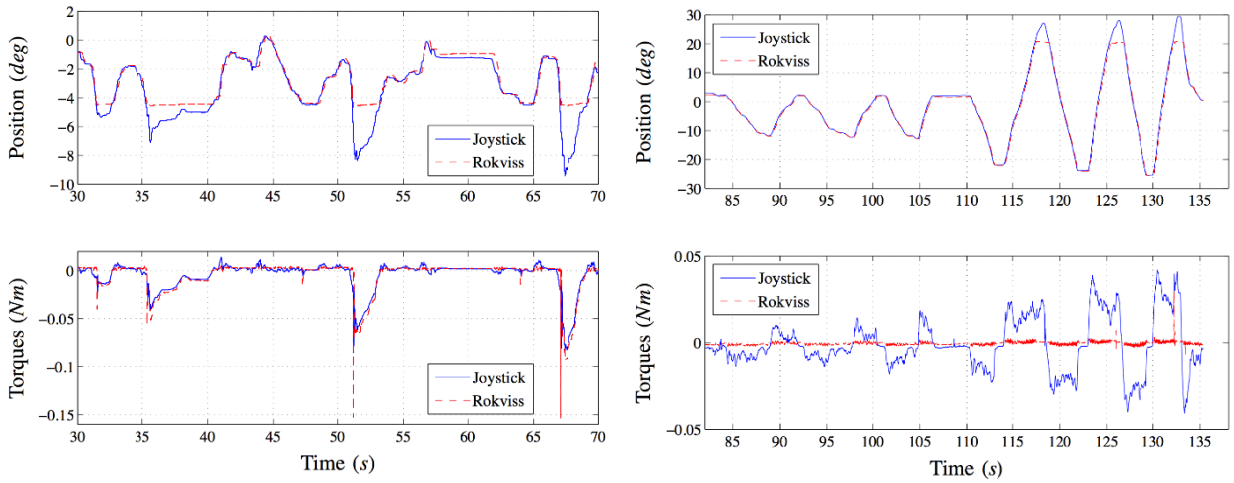


Рисунок 5 – Измерения положения и силы во время проведения сеанса через канал космической связи S-диапазона. Слева: во время жесткого контакта робота с панелью заданий; справа: во время свободного перемещения.

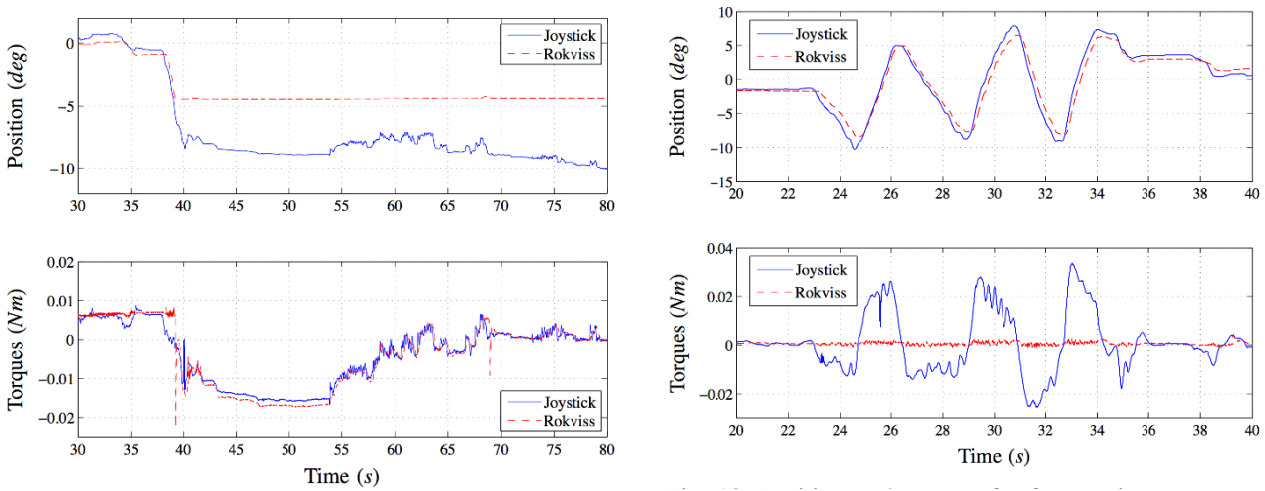


Рисунок 6 – Измерения положения и силы во время тренировки экипажа из ЦПК через Интернет. Слева: во время жесткого контакта робота с панелью заданий; справа: во время свободного перемещения

Эксперименты с джойстиком на борту МКС доказали, что все программное и аппаратное обеспечение джойстика, а также система телеприсутствия надежно функционируют. Джойстик способен обеспечить стабильную и надежную силомоментную обратную связь благодаря быстрому интерфейсу реального времени и низким внутренним задержкам. Аппаратные и программные компоненты джойстика были проверены в космическомэксперименте«Контур-2». Космонавты Олег Кононенко и Сергей Волков, принимавшие участие в эксперименте, выполнили экспериментальные задачи с роботом ROKVISS, расположенным в DLR в Оберпфаффенхофене (Германия) с борта Российского сегмента МКС. Технологии компенсации силовой обратной связи и задержек для двустороннего контроля были успешно оценены [3]. На послеполетном разборе космонавты сообщили, что с помощью силомоментного джойстика задачи эксперимента были легко выполнимы. Были проведены сравнения различных подходов телеприсутствия с точки зрения производительности системы и оператора, а результаты наземных и космических сеансов были сопоставлены, чтобы лучше оценить влияние микрогравитации на производительность сенсомоторной системы во время управления в режиме телеприсутствия. Предварительные анализы показали, что по сравнению с наземными условиями в условиях микрогравитации точность позиционирования ухудшается. Тем не менее, эти потери производительности частично могут быть компенсированы за счет реализации демпфирования движения на стороне джойстика. Одной из наиболее интересных особенностей подхода двустороннего управления на основе подхода TDPA является то, что настроенная система близка к идеалу и может уверенно работать в условиях связи с МКС и тренировочных сеансах по сети Интернет с гарантированной стабильностью.

Эксперимент ЦНИИ РТК

Во время первого этапа эксперимента ЦНИИ РТК космонавт с борта РС МКС управлял кинематически избыточным манипулятором «Сурикат», оснащенным указателем и световыми мишенями, расположенными вокруг (см. рисунок 2) [7, 8]. Световые мишени загорались на короткий промежуток времени, в течение которого оператор должен подвести манипулятор к мишени и коснуться ее указателем. В отличие от немецкого робота ROKVISS «Сурикат» не оснащен датчиками момента, поэтому силомоментная обратная связь на джойстике отражала текущее положение робота и динамику его перемещений таким образом, чтобы оператор не мог перемещать рукоятку джойстика быстрее, чем робот достигнет заданной позиции, принимая во внимание задержку в контуре управления и инерцию самого робота.

Еще одним существенным отличием систем управления DLR и ЦНИИ РТК было наличие в контуре управления ЦНИИ РТК сегмента Интернет (см. рисунок 1). Это накладывало дополнительные ограничения на систему управления, в том числе увеличенные задержки, высокий процент потери пакетов и более высокий джиттер, как показано на рисунке 3. Несмотря на это созданная телекоммуникационная инфраструктура обеспечила передачу разнородного трафика с приемлемым качеством сервиса для каждого из каналов управления и обратной связи. Наиболее критичный к задержкам и пропускной способности двунаправленный канал телеуправления обеспечил суммарную задержку передачи по контуру управления и обратной связи (RTT, Round Trip Time) в пределах 85 мс. На рисунке 7 приведены графики RTT для сеансов ЦНИИ РТК. На графиках видно изменение значений RTT, связанное с изменением расстояния от РС МКС до наземной станции в течение времени сеанса.

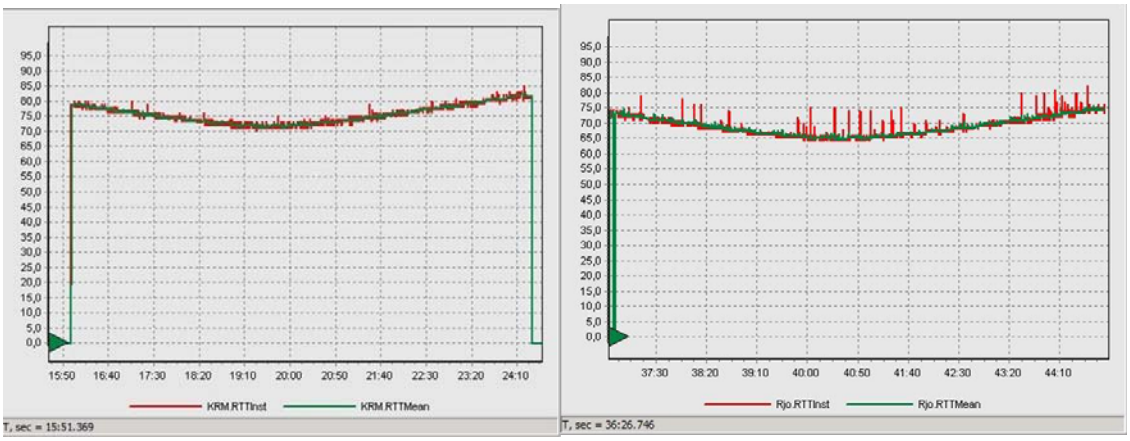


Рисунок 7 – RTT между РСМКС и ЦНИИРТК во время двух различных сеансов

Созданная система телеуправления обеспечила дистанционное управление в ручном режиме с борта РС МКС роботами, находящимися на Земле. Оператор на борту РС МКС получал обратную связь (ОС) от робота по нескольким каналам:

−тактильная ОС, работающая на основе информации, передаваемой между контроллерами приводов робота и джойстика. Минимальная задержка в данном канале ОС достигалась за счет функционирования контроллеров в режиме реального времени и обработки сетевых пакетов данного канала с наивысшим приоритетом. Этот вид ОС давал оператору тактильную информацию об инерции системы в условиях отсутствия датчиков момента на управляемом роботе;

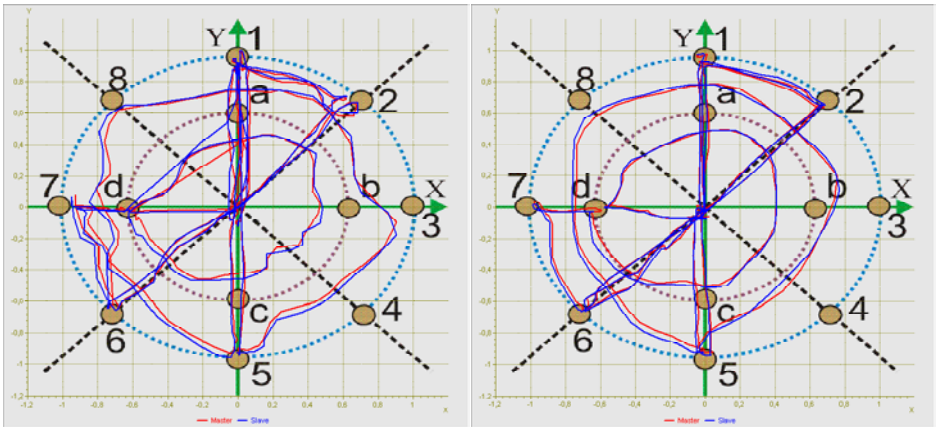
−визуальная ОС, получаемая путем трансляции видеоизображения с камеры, установленной на роботе, или с обзорной камеры. Для данного вида ОС определен баланс между качеством передаваемого изображения, частотой его обновления и задержкой формирования изображения для оператора при наличии существенных ограничений на пропускную способность канала связи (пропускная способность потока на борт МКС – 256 кбит/с). В связи с необходимостью применения алгоритмов сжатия информации данный вид ОС дает существенное запаздывание, обусловленное обработкой данных на передающей и принимающей сторонах;

−визуальная ОС, получаемая путем визуализации движения 3D-модели робота на экране лэптопа оператора. В сеансах управления роботом «Сурикат» для анимации 3D-модели использовалась телеметрическая информация, поступающая от робота по приоритетному каналу, что обеспечивало малые задержки отображения. Компактность передаваемых данных позволила при малом расходовании полосы пропускания канала обеспечить более высокую частоту обновления изображения (по сравнению с видео), что существенно улучшило динамичность представления картины окружающего пространства.

Эффективность комбинирования нескольких видов обратной связи – тактильной (усилие в рукоятке ЗМ) и визуальной (видео и модель на экране) – дополняющих друг друга для обеспечения виртуального погружения оператора в среду функционирования робота, подтверждена успешным выполнением манипуляционных и локомоционных заданий в проведенных сеансах телеуправления.

Силомоментный джойстик в эксперименте использовался в составе разных систем телеуправления, предназначенных для управления разнотипными роботами. Архитектура программного обеспечения позволила выбирать структуру контроллера джойстика в зависимости от текущего сеанса (DLR или ЦНИИ РТК) и динамически изменять его параметры во время сеанса.

Для управления роботом «Сурикат» использовалась двухканальная архитектура управления с контроллерами, разработанными в ЦНИИ РТК: между джойстиком и роботом передавалась информация о текущих координатах. Контроллер джойстика обеспечивал на рукоятке реализацию так называемой виртуальной пружины, связывающей положение робота и рукоятки джойстика. Кроме того, контроллер обеспечил очувствление виртуальной массы и вязкости. Введение силомоментной обратной связи для управления роботом «Сурикат», не имеющим датчиков момента, дал положительные результаты в виде повышения скорости и точности выполнения операций. На рисунке 8 приведены траектории движения рукоятки джойстика и робота при отсутствии и при наличии силомоментной обратной связи во время выполнения одного и того же задания – перемещения манипулятора по окружности – в сеансах эксперимента.



а) б)

Рисунок 8 – Траектории движения рукоятки джойстика (Master) и робота (Slave)
а) без силомоментной ОС; б) с виртуальной пружиной и массой

Универсальная система телеуправления роботами

Система телеуправления с силомоментным джойстиком, изначально разработанная для двух роботов (ROKVISS и «Сурикат») с соответствующими контроллерами DLR и ЦНИИ РТК, после успешного проведения серии сеансов была использована для управления иными роботами. Лёгкий мобильный робот «Юла» (ЦНИИ РТК), в отличие от манипулятора «Сурикат», потребовал применения позиционно-скоростного управления: оператор управлял направлением движения, а не позицией робота. «Юла» не была оснащена датчиками обнаружения препятствий, поэтому для силомоментного управления использовалась обратная связь на основе модели плоского полигона и системы технического зрения. Космонавт видел 2D-модель полигона с препятствиями, границами и движущимся роботом, а также видео с камеры робота. Задачей космонавта было перемещать робота по лабиринту, обходя препятствия с помощью силомоментной обратной связи, которая в этом случае рассчитывалась по расстоянию от робота до препятствия: чем ближе препятствие, тем больше оператор ощущает на рукоятке усилие, направленное в противоположную сторону от препятствия.

При управлении антропоморфным роботом «Джастин», расположенным в DLR, было использовано фиксированное отображение двух координат джойстика на два шарнира робота, а мини-джойстик (четырехпозиционный переключатель на рукоятке) использовался для управления движением головы со встроенной в неё видеокамерой. В сеансе кооперативного управления использовалось два пространственно-разнесенных джойстика: оператор с борта РС МКС управлял правой рукой «Джастина», оператор в ЦНИИ РТК – левой рукой. В соответствии с командами координатора «Джастин» под управлением двух операторов принимал мяч двумя руками и перемещал его в горизонтальной и вертикальной плоскостях (см. рисунок 9).

Таким образом, продемонстрирована универсальность разработанной системы телеуправления, позволяющая использовать один и тот же двухстепенной джойстик с силомоментной обратной связью для управления роботами, различающимися по назначению, числу степеней свободы и кинематическим схемам.

Рисунок 9 – Российский космонавт Олег Кононенко во время сеанса эксперимента «Контур-2» управляет роботом «Джастин». Сеанс транслировался в ЦПК во время проведения XI Международной научно-практической конференции «Пилотируемые полёты в космос» (скриншот с компьютера наземного оператора ЦНИИ РТК)

Основные результаты эксперимента «Контур-2»

Всего с августа по декабрь 2015 года было проведено 23 сеанса управления, из которых:

−9 сеансов DLR по отработке управления роботом ROKVISS;

−4 сеанса ЦНИИ РТК по отработке управления роботом «Сурикат»;

−5 сеансов ЦНИИ РТК по отработке управления мобильного робота «Юла»;

−5 совместных сеансов DLR и ЦНИИ РТК по кооперативному управлению антропоморфным роботом «Джастин».

На рисунке 10 представлены фотографии российских космонавтов на борту РС МКС во время выполнения заданий в рамках эксперимента «Контур-2». Во время проведения эксперимента также

была установлена двусторонняя голосовая связь с космонавтами, а также обеспечена передача видеоизображения с борта РС МКС.

Во время проведения эксперимента «Контур-2» были установлены мировые достижения в области телеуправления с борта МКС наземными динамическими объектами с применением двухстепенного задающего устройства с силомоментной обратной связью:

− август 2015 – высокочувствительное телеуправление (HighFidelityTelepresence) роботом ROKVISS, DLR;

Рисунок 10 – Российские космонавты во время проведения сеансов эксперимента «Контур-2»: О.Д. Кононенко (слева), С.А. Волков (справа)

− август 2015 – управление манипулятором с борта МКС через Интернет (робот «Сурикат», ЦНИИ РТК);

− октябрь 2015 – управление мобильным роботом с борта МКС через Интернет (робот «Юла», ЦНИИ РТК). В эксперименте ЕКА (сентябрь 2015) был реализован аналогичный сценарий, при этом одностепенной джойстик «Haptic» использовался только для управления манипулятором мобильного робота;

− ноябрь 2015 – управление антропоморфным роботом с борта МКС (робот «Джастин», DLR);

− ноябрь 2015 – кооперативное управление антропоморфным роботом с борта МКС и из ЦНИИ РТК (робот «Джастин», DLR – ЦНИИ РТК).

Основными научно-техническими результатами эксперимента являются:

−двухканальная (ЦНИИ РТК) и четырехканальная (DLR) системы телеуправления наземными роботами с борта РС МКС;

−верифицированные параметры моделей систем телеуправления ЦНИИ РТК и DLR, обеспечивающих тактильную обратную связь с сохранением устойчивости системы при средней задержке в канале управления до 85 мс;

−подтверждение целесообразности использования силомоментного ЗМ для управления робототехническими объектами в условиях микрогравитации;

−доказательство эффективности применения комбинации тактильной и визуальной обратной связи в замкнутом контуре управления, включающем человека-оператора, работающего в условиях микрогравитации;

−подтверждение пригодности созданной гетерогенной распределенной телекоммуникационной системы в качестве инфраструктуры для удаленного управления наземными робототехническими объектами с борта РС МКС;

−подтверждение пригодности разработанной системы для телеуправления роботами, различающимися по назначению, числу степеней свободы и кинематическим схемам, от двухстепенного силомоментного джойстика;

Заключение

В рамках эксперимента «Контур-2» были успешно решены научно-технические задачи создания технологий телеуправления наземными робототехническими системами с борта МКС. Создана сетевая инфраструктура для верификации такой распределенной системы удаленного управления. Впервые были проведены сеансы управления с борта РС МКС наземными динамическими объектами с применением двухстепенного задающего устройства с силомоментной обратной связью. Освоенные технологии предназначены для робототехнических систем космического назначения при реализации орбитальных и напланетных миссий.

1. ROKVISS – robotics component verification on ISS current experimental results on parameter identification / A. Albu-Schaeffer, W. Bertleff, B. Rebele, B. Schaefer, K. Landzettel, G. Hirzinger // IEEE International Conference Robotics and Automation. – 2006. – P. 3879-3885.

2. Эксперимент «Контур» на Российском сегменте МКС [Электронный ресурс] / К. Ландцеттель, В.С. Заборовский, А.С. Кондратьев, А.В. Силиненко, М.Ю. Беляев, Е.В. Бабкин // ГМИК им. К.Э. Циолковского. Научные чтения памяти К.Э. Циолковского, г. Калуга. – 16.09.2009.

3. J. Artigas, R. Balachandran, M. Stelzer, B. Weber, J.-H. Ryu, C. Riecke, and A. Albu-Schaeffer, «KONTUR-2»: Force-feedback Teleoperation from the International Space Station," in Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA 2016.

4. J. Artigas, J. Ryu, C. Preusche, and G. Hirzinger, «Network representation and passivity of delayed teleoperation systems», in IROS, pp. 177–183, IEEE, 2011.

5. B. Weber, S. Schaetzle, C. Riecke, B. Brunner, S. Tarassenko, J. Artigas, R. Balachandran, and A. Albu-Schffer, «Weight and weightlessness effects on sensorimotor performance during manual tracking», in print, accepted for EuroHaptics, 2016.

6. Riecke, C., Artigas, J. Balachandran, R., Bayer, R., Beyer, A., Brunner, B., Buchner, H., Gumpert, T., Gruber, R., Hacker, F., Landzettel, K., Plank, G., Schätzle, S., Sedlmayr, H.-J., Seitz, N., Steinmetz, B.-M., Stelzer, M., Vogel, J., Weber, B., Willberg, B., Albu-Schäffer, A.: KONTUR-2 mission: the DLR force feedback joystick for space telemanipulation from the ISS. In: Proceedings of i-SAIRAS 2016, Peking, China (2016)

7. «Контур-2» - совместный российско-германский космический эксперимент по силомоментному управлению наземными роботами с борта МКС / М.Ю. Гук, А.В. Силиненко // Труды международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника», 1-2 октября 2014, Санкт-Петербург: Изд-во «Политехника-сервис», 2014. – С. 59-64.

8. Телеуправление напланетными роботами с борта МКС в рамках космического эксперимента «Контур-2» / Заборовский В.С., Гук М.Ю., Мулюха В.А., Силиненко А.В., О.Н. Волков, М.Ю. Беляев // Труды международной научно-практической конференции «Научные исследования и эксперименты на МКС», 9-11 апреля 2015, Москва: Изд-во ИКИ РАН, 2015. – С. 64-65.

ТЕОРИЯ И МЕТОДЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ РТС / THEORY AND DESIGN METHODS OF RTS

A.A. Tachkov

CONCEPTUAL DESIGN OF MOBILE ROBOTS USING STATISTACAL SIMULATION

Research and training center «Robotechnics», Bauman Moscow State Technical University
tachkov@bmstu.ru

Abstract

The paper presents an approach to the conceptual design of mobile robots based on statistical simulation. A distinctive feature of the approach is probabilistic formulation of the problem and the use of a single integrated indicator of efficiency, which more fully describes the goal of the mobile robot solved the task. This performance indicator is the probability of the task. The formal statement of the problem is considered. A statistical simulation algorithm is described. This approach is proposed for the formation of alternative options for building individual subsystems of mobile robots. An example of this approach is given in the determination of adhesion system parameters of mobile wall-climbing robot based on statistical simulation algorithm implemented in Matlab.

Keywords: mobile robot, statistical imitating modeling, efficiency.

А.А. Тачков

КОНЦЕПТУАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ СТАТИСТИЧЕСКОГО ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

НУЦ «Робототехника», МГТУ им. Н.Э.Баумана, Москва
tachkov@bmstu.ru

Аннотация

В статье рассматривается один из подходов к концептуальному (внешнему) проектированию мобильных роботов на основе статистического имитационного моделирования. Отличительной чертой подхода является вероятностная постановка задачи и применение единого комплексного показателя эффективности, наиболее полно характеризующего цель решаемой роботом задачи, – вероятности ее выполнения. Рассмотрена формальная постановка задачи и приведен алгоритм статистического моделирования. Автором предлагается использовать данный подход для формирования альтернативных вариантов построения отдельных подсистем мобильных роботов, и согласования их работы в рамках синтеза всей системы на основе единого показателя качества (эффективности). В работе приведен пример использования подхода при определении облика подсистемы удержания робота на поверхности перемещения на основе имитационного статистического моделирования. Алгоритм моделирования реализован в пакете Matlab.

Ключевые слова: мобильный робот, статистическое имитационное моделирование, эффективность.

Введение

Важным свойством мобильных роботов как сложных технических систем, зачастую упускаемым из виду разработчиками, является их функциональная завершенность, другими словами, пригодность к выполнению той конкретной прикладной задачи, для которой они собственно и проектируются. Традиционно в процессе проектирования сложных технических систем принято выделять два этапа, условно называемых внешним и внутренним проектированием [1-3]. На этапе внешнего проектирования, иногда именуемого также «концептуальным проектированием» формируется облик будущей системы, а на этапе внутреннего проводится ее структурно-параметрический синтез. Как правило, выполнение первого этапа осуществляется представителем заказчика, а второго – разработчиком.

Для робототехники характерна ситуация, когда разработчик вынужден одновременно выполнять оба этапа. И, если процессу внутреннего проектирования в робототехнике посвящено подавляющее число работ, то этап внешнего проектирования остается практически не освещенным, хотя именно на нем определяются те исходные данные, которые необходимы для проведения структурно-параметрического синтеза.

Следует отметить особенность внешнего проектирования, отличающую его от внутреннего, – принципиально вероятностную постановку задачи проектирования [3], поэтому в настоящей работе рассматривается один из подходов к проблеме концептуального проектирования мобильных роботов.

Особенности постановки задачи концептуального проектирования мобильных роботов

На этапе внешнего (концептуального) проектирования выявляются требования к мобильному роботу и решаемой с помощью него прикладной задачи, обусловленные их окружением, то есть внешней средой и целевым предназначением. Соответственно возникают и альтернативные варианты построения робота и организации управления им. Вполне очевидно, что для выбора одного из них необходимо оценивать качество разрабатываемого робота и эффективность достижения цели решаемой роботом задачи. Актуальность проблемы концептуального проектирования заключается в выборе варианта еще до создания опытного образца робота, так как после создания выбирать уже, как правило, поздно.

Наиболее информативным комплексным показателем эффективности достижения цели (далее операции) является вероятность P_{B3} выполнения задачи роботом:

$$P_{B3} = P\left(\mathbf{Y}_{(3)} \in \left\{\mathbf{Y}_{(3)}{}^{\partial}\right\}\right),$$

где $\mathbf{Y}_{(3)} = \left(\mathbf{v}_{(n_1)}, \mathbf{r}_{(n_2)}, \boldsymbol{\tau}_{(n_3)}\right)$ – вектор-строка показателей эффективности, включающий в себя три аспекта: $\mathbf{v}_{(n_1)}$ – n_1-мерный вектор целевой результативности операции, $\mathbf{r}_{(n_2)}$ – n_2-мерный вектор затрат ресурсов на получение целевой результативности, $\boldsymbol{\tau}_{(n_3)}$ – n_3-мерный вектор затрат времени на получение целевой результативности; $\left\{\mathbf{Y}_{(3)}{}^{\partial}\right\}$ – область допустимых значений показателя $\mathbf{Y}_{(3)}$ [3,4].

Каждая из компонент вектора $\mathbf{Y}_{(3)}{}^{\partial}$ зависит как от характеристик робота и организации операции, так и от условий его функционирования и применения [3]:

$$\mathbf{Y}_{(3)} = \mathbf{Y}_{(3)}\left(\mathbf{A}^1_{(k_1)}, \mathbf{A}^2_{(k_2)}, \mathbf{B}^1_{(l_1)}, \mathbf{B}^2_{(l_2)}\right) = \mathbf{Y}_{(3)}\left(\mathbf{A}_{(k)}, \mathbf{B}_{(l)}\right), \quad (1)$$

где $\mathbf{A}^1_{(k_1)} = \mathbf{A}^1_{(k_1)}\left(\mathbf{B}^1_{(l_1)}, \mathbf{B}^2_{(l_2)}\right)$ – характеристики мобильного робота, $\mathbf{A}^2_{(k_2)} = \mathbf{A}^2_{(k_2)}\left(\mathbf{B}^1_{(l_1)}, \mathbf{B}^2_{(l_2)}\right)$ – характеристики организации операции, $\mathbf{B}^1_{(l_1)}$ – характеристики условий функционирования мобильного робота, $\mathbf{B}^2_{(l_2)}$ – условия применения мобильного робота, $k = k_1 + k_2$.

В свою очередь, компоненты вектора $\mathbf{Y}_{(3)}{}^{\partial}$ допустимых значений результатов операции зависят от условий применения робота и связанных с ними требований, предъявляемых к результатам операции лицом, принимающим решение (ЛПР): $\mathbf{Y}_{(3)}{}^{\partial} = \mathbf{Y}_{(3)}{}^{\partial}\left(\mathbf{B}^2_{(l_2)}\right)$.

Поскольку на характеристики, параметры мобильного робота, условия функционирования и применения действует целый ряд случайных априори неизвестных факторов, то до проведения операции вектор $\mathbf{Y}_{(3)}$ является случайным, а допустимые значения $\mathbf{Y}_{(3)}{}^{\partial}$ – неопределенными [3,5]. Следовательно,
вероятность выполнения задачи можно записать как $P_{B3} = P\left(\hat{\mathbf{Y}}_{(3)} \in \left\{\hat{\mathbf{Y}}_{(3)}{}^{\partial}\right\}\right)$, где символ $\wedge$ обозначает случайное событие.

Критериями эффективности решения задачи роботом, а соответственно и его качества, служат критерий пригодности G: $P_{B3} \geq P_{B3}^{TP}$ и критерий оптимальности O: $P_{B3} = P_{B3}^{OIIT}$. Таким образом, организуется замкнутая схема оценивания эффективности управления и качества мобильного робота: на первом этапе определяется комплексный показатель эффективности $P_{B3} = P\left(\hat{\mathbf{Y}}_{(3)} \in \left\{\hat{\mathbf{Y}}_{(3)}{}^{\partial}\right\}\right)$, а на втором – производится непосредственно его оценивание по критерию пригодности G или оптимальности O.

При оценке качества робота используется оператор (2), получаемый из (1) путем исключения из рассмотрения условий применения мобильного робота:

$$\mathbf{Y}_{(3)} = \mathbf{Y}_{(3)}\left(\mathbf{A}^1_{(k_1)}, \mathbf{A}^2_{(k_2)}, \mathbf{B}^1_{(l_1)}\right). \quad (2)$$

В математическом плане общая задача концептуального проектирования, то есть нахождения вектора $\mathbf{A}^1_{(k_1)}$ из выражения (2) относится к классу неклассических вариационных задач высокой размерности. В настоящее время достаточно корректных общих методов решения таких задач не существует, что вынуждает применять приемы, использующие идею декомпозиции проектируемой системы с последующей субоптимизацией составляющих ее подсистем [2]. Поэтому для задачи концептуального проектирования целесообразным является применение метода статистического имитационного моделирования, который с одной стороны позволяет провести модельный эксперимент

с роботом в условиях искусственно создаваемой неопределенности ситуации, а с другой получить необходимую исходную информацию для априорного (до проведения натурного эксперимента) оценивания качества альтернативных вариантов построения мобильного робота.

Статистическое имитационное моделирование оценки эффективности выполнения задачи робототехнической системой

Согласно [6] термин «имитационное моделирование» означает, что имеют место такие модели, в рамках которых нельзя заранее вычислить и предсказать результат. В отличие от аналитических моделей осуществляется прогон имитационных моделей, а не их решение. Это означает, что имитационная модель служит лишь источником апостериорной информации, необходимой для оценки $P_{ВЗ}$. Проблема адекватности имитационной модели решается на основе ее структурно-функционального подобия реальной системе и калибровки частных моделей ее элементов и подсистем на детальных моделях более низкого уровня, например, как это показано в работе [7].

Оценивание эффективности выполнения задачи проводится в соответствии с типовым алгоритмом статистического имитационного моделирования, блок-схема которого приведена на рис.1 [3]. Алгоритм включает в себя два цикла: внешний по i, выполняющийся N_1 раз, внутренний поj, выполняющийся N_2 раза. Блок 1 осуществляет ввод исходных данных. Блок 2 организует начало внешнего цикла, инициализируя счетчик единицей. Блок 3 устанавливает факт окончания внешнего цикла испытаний. Блок 4 моделирует вектор $\hat{\mathbf{Z}}_{(3)}$ предельно допустимых значений результатов выполнения задачи. Блок 5 организует начало внутреннего цикла, инициализируя счетчик циклов единицей и очищая счетчик числа m_i «успешных» испытаний внутреннего цикла, в которых при фиксированных требованиях $\mathbf{Z}^i_{(3)}$ к задаче была достигнута цель. Блок 6 моделирует вектор $\mathbf{Y}^j_{(3)}$ результатов выполнения задачи (операции) на основе ее моделирования в соответствии с (1) и является центральным блоком в алгоритме. Блок 7 реализует критерий пригодности G результатов операции для использования мобильного робота по целевому назначению. Выполнение блоком 7 проверяемых условий означает достижение цели. Блок 8 подсчитывает число m_i «успешных» испытаний внутреннего цикла. Блок 9 подсчитывает число j пройденных испытаний внутреннего цикла. Блоком 10 устанавливается факт окончания внутреннего цикла испытаний. Блок 11 случит для вычисления оценки ω_i значения условной (апостериорной) вероятности достижения цели операции в i-м испытании внешнего цикла. Блок 12 подсчитывает число пройденных испытаний внешнего цикла. Блок 13 вычисляет значение оценки средней (априорной) вероятности достижения цели. Блок 14 осуществляет вывод о полученной в ходе моделирования оценки.

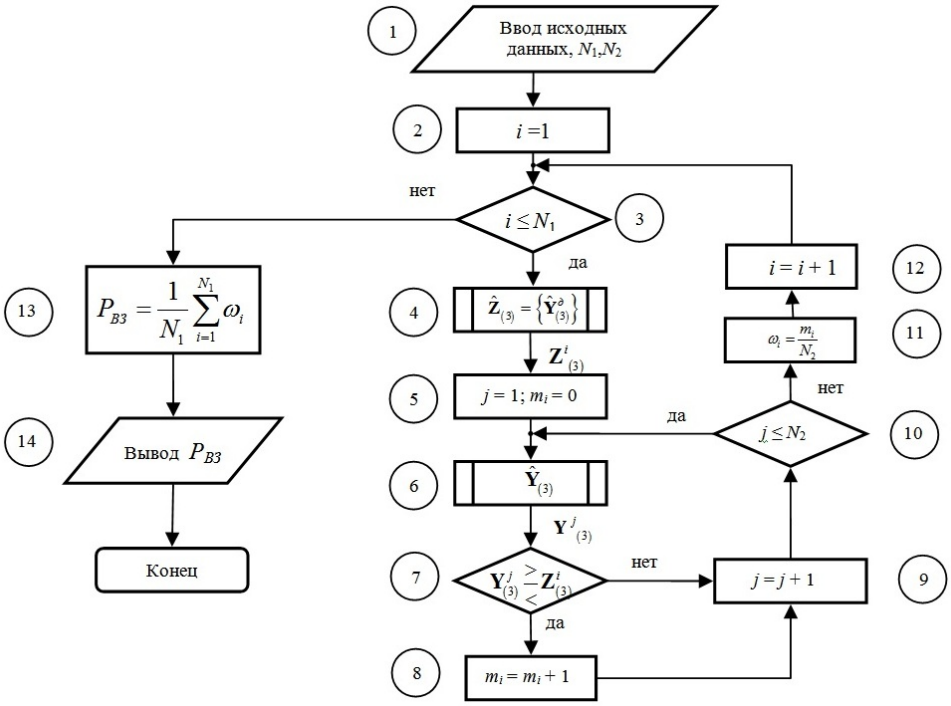


Рисунок 1 –Блок-схема алгоритма статистического моделирования

Таким образом, представленный алгоритм реализует процесс оценивания эффективности выполнения задачи мобильным роботом на основе статистического моделирования в условиях неопределенности требований к ее результатам. Под «неопределенностью» понимается субъективная вероятность к требованиям операции, задаваемой ЛПР. В то же время эта «субъективная» вероятность является в значительной мере и объективной, поскольку основана на опыте изучения ЛПР окружающей его объективной реальности и не является чисто умозрительной [3,8].

Автором предлагается использовать данный алгоритм для первой итерации в определении облика отдельных подсистем мобильного робота на этапе его концептуального проектирования – отборе и сравнении альтернатив, на основе использования комплексного показателя эффективности P_{B3} и критерия пригодности. Для этого рассматриваемая подсистема S подвергается статистическому моделированию для определения $\hat{\mathbf{Y}}_{(3)}$ для неслучайных параметров $\mathbf{A}^1_{(k_S)}$, а влияние остальных подсистем робота играет роль неопределенных требований $\hat{\mathbf{Z}}_{(3)}$ к этой подсистеме. Определив по результатам моделирования пригодные $\mathbf{A}^1_{(k_S)}$ S-подсистемы мобильного робота, при которых $P_{B3_S} \geq P^{TP}_{B3}$, переходят к рассмотрению следующей подсистемы (S+1), корректируя требования $\hat{\mathbf{Z}}_{(3)}$ для этой подсистемы с учетом специфики решаемой задачи. В результате первой итерации будет сформировано несколько пригодных альтернатив облика мобильного робота, удовлетворяющих выполняемой задаче.

Концептуальное проектирование подсистемы удержания на примере малогабаритного автономного робота вертикального перемещения

Поясним предлагаемую идею на примере концептуального проектирования подсистемы удержания малогабаритного автономного мобильного робота вертикального перемещения (РВП), описанного в работе [7]. Данный робот состоит из целого ряда подсистем, среди которых можно выделить три основных: подсистема удержания робота на поверхности, приводная подсистема перемещения и подсистема энергообеспечения.

Подсистема удержания РВП физически связана с подсистемой перемещения посредством общих модулей: двух модулей поступательного и одного модуля вращательного движения. Каждый из модулей поступательного движения оснащен бортовыми вакуумными насосами в количестве N-штук (суммарное количество насосов $2N$), вакуумным ресивером объемом V (суммарное количество ресиверов – два) и определенным количеством вакуумных захватов с уплотнительными контурами в количестве n и m соответственно (суммарное количество захватов $n+m$). Поступательное движение робота осуществляется посредством поочередной фиксации этих захватов к поверхности движения и обеспечивается за счет вращения кривошипов длиной l. За один шаг принимается полный оборот кривошипа, то есть перемещение робота на дистанцию $2l$. Радиус кривизны поверхности больше двух метров. Движение осуществляется по однородной вертикальной поверхности, имеющей местные дефекты: волнистость, шероховатость, трещины, имеющие сложные законы распределения, характеристики которых приведены в работе [7], – и описывается вектором $\mathbf{B}^1_{(l_1)}$. Как установлено в той же работе количество шагов робота до первой остановки подчиняется экспоненциальному закону распределения, при условии, что сделан первый шаг. Так же установлено, что в зависимости от N и V, l можно определить агрегированные параметры движения робота, такие как: вероятность не выполнить последующее движение $P_{нд}$, вероятность отрыва от поверхности $P_{отр}$, вероятность сделать более одного шага $P_{ш}$, математическое ожидание количества шагов M_S, время работы насосов $t_н$, подчиняющееся гамма-распределению с параметрами k, θ.

Движение робота осуществляется до тех пор, пока не пройдено заданное расстояние или не произошел отрыв робота. Если робот не может сделать очередной шаг, то направление движения выбирается пропорционально углу отклонения робота от цели (сближение с целью). Если угол отклонения равен нулю или робот не может двигаться в скорректированном направлении, то он начинает движение в случайном направлении α в секторе $[-\pi/4; \pi/4]$ от текущего направления (обход непроходимого участка) на определенное количество шагов C. После очередной остановки производится новая коррекция поворота.

Требования к результатам выполнения задачи, часть из которых является ограничениями от смежных подсистем, носят неопределенный характер. При этом можно считать, что отрыв робота от поверхности происходит при достижении давления в полостях захватов, удерживающих робот на поверхности, уровня в 70 кПа, длина l не превышает некоторой величины, например 7,5 см (требования подсистемы перемещения). Работа, затрачиваемая на перемещение, может составлять величину от 20 до 40 Вт·ч (требования системы энергообеспечения). Задача робота считается выполненной, если его перемещение составило от 5 до 7 метров, в зависимости от проводимой операции. Время движения не должно

превышать трех часов (требования ЛПР). Условия перемещения неопределенные в силу статистической неоднородности поверхности и наличия трещин. Требуется определить облик подсистемы удержания робота на поверхности.

В формализованном виде задачу можно определить следующим образом. Вектор параметров подсистемы удержания автономного РВП $\mathbf{A}^1_{(6)}$

$$\mathbf{A}^1_{(6)} = \left(l; P_{\text{нд}}\left(N,V,\mathbf{B}^1_{(l)}\right); P_{\text{отр}}\left(N,V,\mathbf{B}^1_{(l)}\right); P_{ш}\left(N,V,\mathbf{B}^1_{(l)}\right); M_S\left(N,V,\mathbf{B}^1_{(l)}\right); t_н\left(N,V,\mathbf{B}^1_{(l)}\right)\right); l< 0{,}075.$$

Вектор параметров проводимой операции $\mathbf{A}^2_{(2)} = (20,\alpha)$, вектор условий функционирования РВП $\mathbf{B}^1_{(l)}$

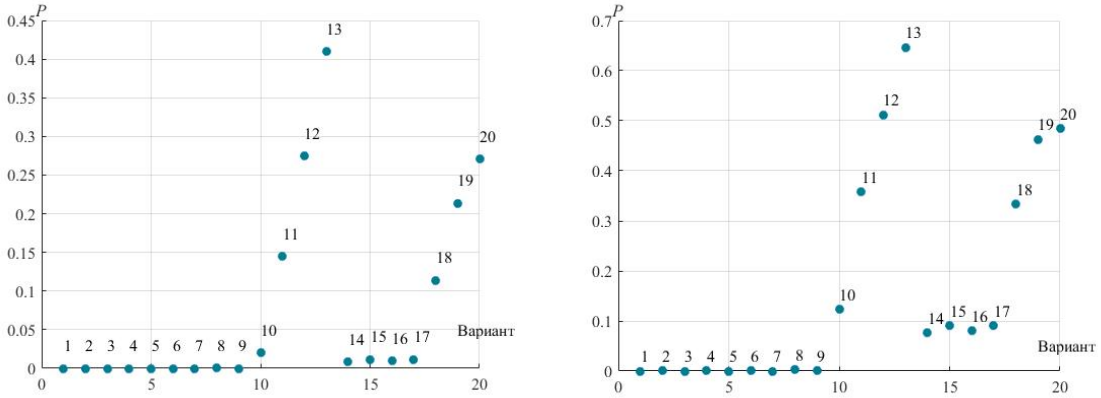
Требования к результатам выполняемой задачи $\hat{\mathbf{Z}}_{(3)} = \left\{\hat{\mathbf{Y}}^{\partial}_{(3)}\right\} = \left(\{5,...,7\},\{20,...,40\},\{1,...,10800\}\right)$.

Необходимо определить варианты построения подсистемы удерживания (N,V), удовлетворяющие требованиям и сравнить альтернативы.

Для решения данной задачи автором реализовано программное обеспечение в среде Matlab в виде m-сценариев, позволяющих проводить статистическое имитационное моделирование в соответствии с алгоритмом, блок-схема которого приведена на рис.1. В качестве исходных данных для моделирования использовались результаты работы [7]. Результаты статистического имитационного моделирования представлены на рис.2. Варианты рассматриваемых альтернатив (N,V) подсистемы удержания приведены в таблице 1.

Таблица 1. Варианты рассматриваемых при моделировании альтернатив

Вариант	N	V, см^3	Вариант	N	V, см^3	Вариант	N	V, см^3	Вариант	N	V, см^3
1	1	10	6	2	100	11	2	2000	16	3	100
2	2	10	7	1	400	12	2	3000	17	3	400
3	1	50	8	2	400	13	2	4000	18	3	1000
4	2	50	9	1	1000	14	3	10	19	3	2000
5	1	100	10	2	1000	15	3	50	20	3	3000



а) б)

Рисунок 2 - Вероятность выполнения задачи для различных альтернатив (а – l= 0,025 м, б – l= 0,05 м)

Из полученных результатов, во-первых, видно, что часть вариантом в принципе непригодна для выполнения задачи, например с 1 по 9. Во-вторых, вероятность выполнения задачи роботом увеличивается с ростом объема ресивера и длиной шага. В последнем случае уменьшается количество шагов, которые необходимо сделать, и вследствие этого повышается вероятность выполнения задачи. В-третьих, при заданных требованиях к результатам операции варианты 12 и 20 обеспечивают примерно одинаковую вероятность выполнения задачи при V=3000 см^3, хотя в варианте 20 используется большее число насосов. При изменении требований результаты будут меняться значительнее.

Заключение

Таким образом, в работе рассмотрен один из подходов к концептуальному проектированию подсистем мобильных роботов, который базируется на вероятностной постановке задачи.

Преимуществом данного подхода является использование единого комплексного показателя, наиболее полно учитывающего цель решаемой роботом задачи, – вероятности ее выполнения.

1. Методологические основы моделирования при предпроектных исследованиях и внешнем проектировании сложных образцов вооружения и военной техники / Б.А. Демидов, С.И. Хмелевский, О.А. Хмелевская // Системи озброэння і вшйськова техніка, 2012, № 2(30), С.138 – 142.
2. Методологические основы внешнего проектирования авиационных комплексов / А.М. Жеребин, Б.В. Топоров, В.М. Горлов // Электронный журнал «Труды МАИ», 2013, выпуск 69. С.1 – 19. Режим доступа: http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=43113
3. Петухов Г.Б., Якунин В.И. Методологические основы внешнего проектирования целенаправленных процессов и целеустремленных систем. – М.: АСТ, 2006, 504 с.
4. Арепин Ю.И. Военно-экономическое обоснование развития вооружения и военной техники // Программные продукты и системы, 2000, № 2, С.10 – 13.
5. Методы оценивания безопасности операций/ В.К. Дедков, Г.Б. Петухов, Нгуен Куанг Тхыонг, В.Ф. Неронов // Вопросы безопасности и устойчивости систем, 2000, № 2, С.40 – 50.
6. Смирнов А.А., Ковалев Д.В., Богданов О.А. Имитационное моделирование противоборства в воздушно-космической сфере // Программные продукты и системы, 2016, № 1, С.160 – 164.
7. Моделирование и оценка эффективности системы удержания малогабаритного автономного робота вертикального перемещения с вакуумными захватами / А.А. Тачков, С.В. Калиниченко, А.Ю. Малыхин // Мехатроника, автоматизация и управление, 2016, № 3 Т.17, С. 178 – 186, DOI: 10.17587/mau/17.178-186.
8. Орлов А.И., Луценко В.И. Системная нечеткая интервальная математика. – Краснодар: КубГАУ, 2014, 600 с.

A. Karpov [1], B. Kryuchkov [2], A. Ronzhin [1], V. Usov [2]

DESIGNING HUMAN-ROBOT INTERACTION IN A UNITED TEAM OF COSMONAUTS AND AUTONOMOUS MOBILE ROBOTS ON THE LUNAR SURFACE

[1]SPIIRAS, Saint-Petersburg, Russia
karpov@iias.spb.su ; ronzhin@iias.spb.su
[2]YU.A.Gagarin Research & Test Cosmonaut Training Center, Star City Moscow region, Russia
b.kryuchkov@gctc.ru ; v.usov@gctc.ru

Abstract

The problems of command interaction are considered in different fields of science. Many works are dedicated to interaction between people having dangerous jobs (pilots, cosmonauts, polar explorers, etc.) in circumstances where the crew works in extreme environments. Recently, the focus of research in this area has been on different models of interaction in groups of robots. The issues of interface designing for coordinated functioning of “mixed” united teams of humans and robots have not been so widely studied yet. In the light of promising projects for lunar missions, the question of whether a team of cosmonauts and mobile robots can meet the requirements of reliability and safe functioning during on-planet activity, when it is particularly important to ensure consistent behavior of the participants to prevent conflicts, efficiently use resources and implement mutual aids in the team in unusual and emergency situations, becomes a matter of current interest. The article deals with the issues of designing human-robot interaction for united teams of humans and robots and of improving humansituational awareness on the basis of an agent-oriented approach.

Keywords: united teams of humans and robots, extreme environments, Human Robot Interaction (HRI), agent-based systems.

Introduction

Cooperation in a united team of people (in this case we consider a small workgroup or a crew) and a group of robots in recent years has attracted the attention of researchers for several reasons. The main of them is that due to achievements in the field of artificial intelligence (AI) and in a number of related technologies (computer vision, the synthesis of complex images, virtual reality, etc.), designing a human-machine system “crew-team-robots” is focused on a large degree of independence of mobile robots. Thus, the robots are able not only to perform quite a complex actions scenario, but also to navigate autonomously and adapt to dynamically changing conditions. Variability of "behavior" of such robots, depending on the situation during application on the moon, raises the question about the trends and methods to control a group of robots as

active agents by the crew. The present level of development of robotics and AI systems still does not allow excluding humans from the decision-making process in case of incomplete data on the situation, or because of the fact that not all situations during the exploration of new areas can be foreseen in advance. In this sense, it is still important to consider the question of the distribution of functions in ergatic systems, which emerged at the first appearance of machines, but taking into account decision-making in distributed systems integrating AI systems.

Further proposals are based on the anthropocentric principle of organizing the interaction between humans and robots in a united team: under no circumstances should a human lose control over the activity of robots, especially in complicated and emergency situations. On the contrary, a human should be permanently included in such control to be able to find non-standard solutions using his cognitive abilities that exceed those of today's AI systems. This latter fact enables us to regard a human as the highest management layer in the hierarchy of interaction support tools that should be designed for the integrated team under consideration.

It is necessary to initially design interaction "human-robot" clearly describing the mechanisms that are used to inform the humans, keep them aware about the situation and give tasks to real robots in the most usual (natural) forms of a dialogue [6,7]. Then a crew of cosmonauts would be able to quickly switch to the mode of supervisory control over one or more robots in case of an emergency situation, e.g. the threat of collision of robots. The difficulties that a human encounters, such as remote interaction with autonomous mobile robots and building a feedback about the state of the environment, require the development of information support tools with the application of a range of modern information technologies [1-3].

Methodology of organizing interaction between humans and robots in a united team

Many authors have noted the increased need for creating and developing the methodology of interaction of groups of intelligent agents as well as for building interfaces that serve the human-robot interaction in a united “mixed” team of people and robots. In this work, as one of possible solutions, we propose to consider the agent-oriented building of HRI, in which “virtual proxy agents” on behalf of the real intelligent agents, operating in a real environment, can act both as sources and as consumers of information transmitted between the participants of team interaction.

This approach develops, to some extent, the ideas of induced virtual reality. It is aimed at substituting really existing active agents by their virtual counterparts, that are able to gather, process, summarize, targetedly deliver and display consistent source data to the potential recipient for rationally solving the tasks within their limits of "skills" and delegated powers on the basis of a common understanding and united semantic interpretation of the current situation.

In other words, in addition to real-world active agents initiating a direct dialogue, some “virtual agents” or proxy-agents of real carriers of artificial and natural intelligence are considered. They can support the course of such interaction, organize it, and provide situational awareness to participants of the dialogue. This comes from understanding the natural limitations of each real agent regarding collection of information about an environment; the extent to which particular problems, composing the common task, are solved; required and existing resources, etc. A key feature of remote management of a group of robots and execution of tasks of situation monitoring is that humans and robots, interacting in a team, coordinate their actions through a dialogue about their current capabilities, immediate goals and effectiveness of solving the previous problems [7, 4].

In the literature on AI [7], this range of methodological problems is considered in terms of finding ways to generate a common semantic basis (for example, in the form of ontology) available for expressing categories of space and time familiar to humans, in relation to the objects of the external environment under the notion of the "model of external world "of the robot. This notion should make up a “framework for the language of communication” which is proposed for actualization of the mental image of a person, based on which he or she takes actions, and for selection of operational tasks to be executed by other team members.

In general, it is necessary to provide for interaction in a problem situation when all members of the team have the right to initiate a dialogue for a certain kind of problem situations. At the same time, a realistic approach requires that defined crew hierarchy levels and primary areas of decision-making competencies of crew members are reflected in ensuring interaction.

The model of cooperation in a united team under conditions of crew’s on-planet activity

Specification of the distribution of functional responsibilities in the space crew is very important because, with regard to manned spaceflights, there is a huge list of tasks requiring specialists able to fulfill these tasks most effectively. In other words, a group of people should include professionals who can solve in the best possible way a particular range of specific tasks (operations) such as those associated with vehicle

control; restoring functionality of a particular mechanism; loading and installation works, etc. In real flights, since the number of participants- cosmonauts is not large, cases when specialists replace each other or duplicate duties in situations critically important for security reasons are inevitable. However, it is necessary to consider which connections should be provided for in the first place and how to "redirect" requests for the interaction of intelligent agents, when a person is overloaded with tasks and does not "fit" in the context of the situation and priorities for executing a specific task in the light of existing space-time constraints. At the same time, realizing that at the heart of this is collective data accumulation, it is desirable to use a well-designed scheme of preparing solutions. Timely coverage of all significant external events in the external environment requires the maximum activity of all participants within the limits of their specialization, competence, awareness and working capacity.

It is also worth noting that the people, who participate in the events, can and must vary in the following way: (a) people who participate in a dialogue remotely, e.g. issue commands from a remote control in the workplace and control the situation using electronic indicators; (b) people who directly perform real operations in a protective gear (a space suit) during extravehicular activity.

In fact, we should differentiate some phases in the interaction between a human and robots, considering separately: (1) the phase of collection and delivery of the initial data to a person taking into account his competence and specialization; (2) the phase of processing and presenting the information to a person using electronic devices; (3) the phase of preparing and making decisions about the need for human intervention in the activity of robots. In this regard, we should also consider the options of direct interaction by type "one operator - one robot", when a human operator assigns control to the robot on condition that implementation of some actions in the automatic mode is not provided.

The human can give commands to the robot in many ways. Each of them has its own advantages and disadvantages. [1] In general, the maximum effectiveness of using robots is connected with their ability to act independently. Therefore, the construction of autonomous robot control systems is being actively studied. Due to these systems the robot can operate independently to achieve a high level objectives, while functions of a human are transformed to the level of an "external observer" who monitors the activity. Autonomous systems can improve overall system performance, for example, when an cosmonaut is able to interact with the entire group of robots. In this case, the efficiency of intervention may require that the communication between human and robot is limited to a narrow vocabulary of commands and a simplified language of communication with the priority of the non-contact control by voice and gesture commands [4, 6].

The model of a teamwork in relation to the conditions of crew's on-planet activity

It is necessary to give a brief description of the tasks that are assigned to a team of people and robots. In this paper, we consider remote interaction during movement of mobile agents - autonomous robots and cosmonauts in a protective gear - on the Moon's surface in the controlled territorial area. Autonomy of robots is ensured through the functioning of a number of onboard devices intended to provide information about the state of their systems, the location, resources, etc. In fact, for such types it is necessary to provide for a proxy agent able to targetedly deliver information to other agents including an cosmonaut of a relevant specialization.

Nowadays, the following roles (areas of specialty) of the cosmonauts in the crew are taken into consideration: (1) Aircraft commander with preferential responsibilities for an emergency intervention and transition to the mode of supervisory control of a particular robot; (2) Flight engineer responsible for controlling robot's working capacity and security of energy resources; (3) Navigator responsible for the control of positioning and preparation of navigation routes; (4) Mission specialist, who has the duties to search artificial objects necessary for decision-making, assess their condition, and organize interaction with robots for the purpose of identification of unknown objects.

The model of cooperation being studied is that every agent has a "set of skills" and resources they bring to the team. Agents-real robots, which are designed to do these tasks, following the realization of the scenario execute a detailed plan drawn up by the crew, while the operational corrections are carried out based on the results of monitoring the course of plan execution. To study the main type of activity of the group of mobile agents - their movement on the lunar surface during exploration, inspection and patrolling the area – we consider a basic configuration of onboard devices of a real robot. This configuration allows the robot to autonomously execute positioning; collect information about the positioning of the nearest objects; communicate with other agents (including through a dialogue in a non-contact mode); transmit telemetry data in the form suitable for the correcting the digital map of the area; perform a self-test of onboard systems for detecting failures that impede the tasks and communication with crew members.

The situation where it is a human who needs aid is much more complicated, especially if the human is directly involved in the movement on the Moon's surface. Each such case must be considered in detail and assessed in advance. In a realistic model of cooperation a real robot is not able to simultaneously serve the needs of several people. In fact, a human must wait until a robot will be available for a dialogue, meanwhile a virtual proxy-robot must be initiated to process requests for performing some action. Thus, on the one hand, at any given point in time each person is provided with the opportunity to control a real robot (but only in single-user mode in order to eliminate conflicts when specifying tasks). On the other hand, according to the aircraft commander's decision and an agreement between those, who conduct works and intend to initiate a particular real robot, it shall be possible to switch over the dialogue with the real robot from one user to another. This agreement is aimed at achieving the necessary responsiveness in case of a rapidly changing operational environment.

The use of an agent-based architecture for team cooperation

The method of building cooperation being considered is based on the methodology of agent-oriented approach, which differentiates between real agents (humans and robots) and virtual agents acting on behalf of the latter in the chains of information transformation; communication and acquisition of new knowledge about the events; and team members' response to them. Real agents act in the physical world. Virtual proxy-agents can not directly change the environment, but they are intended to provide a set of services that improve human awareness. It should be noted that each virtual agent has a limited capacity to provide services. In this sense, virtual agents are task-specific, but cumulatively they should create friendly information environment and enhance situational awareness of cosmonauts.

For example, when tracking a position of real robot, a proxy agent may present on-board information about the positioning of the "original" in unmodified state, without processing it and specifying any coordinate system necessary for the human or the presence of a virtual agent that can collect information about the positioning of all real mobile agents and based on this transmit information to the virtual agent ("digital map"). This, in its turn, initiates the transformation of information into visual form (2D or 3D) depending on the query of the human operator. Time-ordered cartographic information will be available to all participants via the system of virtual agents of information synchronization about events in the external environment to implement induced virtual reality technology when displaying the current situation.

It is vital for humans and robots to be able to communicate effectively in order to exchange knowledge about spatial relations in the external environment for the conduct of orientation. Consequently, the dialogue tools and a command language must possess semantic models which take into account features of human spatial thinking. These models are based on the concept of "body schema" as well as semantics of spatial and temporal relations that allow people to use such relations from natural language. The chain of virtual agents must have the virtual agent "Spatial thinking" that assumes the role of an external observer in order to support the conduct of the spatial orientation of a human participant in the events. This agent's specialization should include the ability to respond to specific user queries about which objects surround a particular robotin different coordinate systems convenient for the human in a particular context of a visual analysis of the situation. In other words, instead of trying to implement such a construction of a "model of the external world" in real robots so that they can understand how people perceive space and the relative position of the surrounding objects, it is proposed to provide this ability to a specialized virtual agent. The latter should be able to serve the needs of any team member taking into account the actual situation and the state of a digital map model. In addition, the agent should use all kinds of information coming through the telemetry channels from computer vision systems of real robots, but more importantly, it should take into account the actual position and orientation in space of the body of the agent who requested the information for spatial orientation. It is clear that, for this purpose, tools for real world simulation by means of virtual and induced reality and 3D-visualization may be needed, which is the subject of special studies [4]. In fact, one can imagine a situation where in order to achieve common solutions it is necessary to replenish the composition of virtual agents with an "agent-substituent" of a specific person. This "agent-substituent" should provide information on current opportunities of the cosmonaut with regard to the relevant knowledge, skills, and ability to respond quickly at a specific point in time, as well as information on cosmonaut's health and working capacity. In the most critical cases not only a crew member should request such information about his or her status in the form of some kind of standardized declaration. Considering this, communication through a wireless data network with wearable bioengineering system should be provided for, which can collect information from the sensors for controlling cosmonaut's health and working capacity that are already used for monitoring when working in a space suit. Within the framework of the developed methodology, it is also logical to consider virtual agents of "user interfaces. When people interact with robots, a need for different possibilities of interaction arises depending on a number of factors: the team configuration (for example, character of an environment and

remoteness of interaction), a workplace arrangement in the environment, communication, etc. [1, 3, 6]. Among the above-mentioned agents the consideration is given to virtual control agents using wearable devices based on motion capture [2], as well as various "non-contact control agents" (for voice and gesture commands transmission) [1,2,4,7], while for stationary cosmonaut workplaces, apparently, graphical user interfaces (GUI) agents will continue to be widely used. The latter can be better integrated with the agents for representation of visual information to the cosmonaut who performs functions of a navigator, a dispatcher and an cosmonaut-engineer responsible for the operation of real robots and prevention of their collisions in the external environment. GUI agents can also be integrated with agents of the reception and processing of telemetry data for constructing the virtual agent "digital map" and options of it displaying to cosmonauts. It is important to emphasize that the graphical map-based interface not only represents the current spatial distribution of the active agents (humans and robots) in visual form, but also shows the status and information about the events obtained from each agent: the task in progress; positioning data; surrounding objects dangerous in terms of collisions; man-made objects suitable for orientation, construction of the route during navigation, etc.

Conclusion

In this paper we attempt to describe the contours of building the interaction between humans and robots in a team, which can be covered by the methodology of information support on the principles of multi-agent systems (MAC) operation. It can be noted that, regardless of the considered forms of cooperation, the construction of the “human-robot” system in a “mixed” team requires functioning of people and robots on the “principle of synergy”, prevention of collisions and avoidance of divergent administrative decisions because of disruption of communication. The possibilities of a group of robots must be estimated in order to put more efforts in fulfilling the tasks which pose a threat to the human body, and /or are executed less effectively when they are human-powered. It is shown that the key to solving many of the problems of this kind is to bridge the gap between natural and artificial intelligence by creating a layer of "intermediaries" or virtual proxy agents. The latter can targetedly deliver data and organize it in a special way to display to the human, but more importantly, are able to operate together with a human in a semantic basis, forming a dialogue in categories and forms familiar to humans. Such decisions may promote a solution to the problem of interaction so that humans and robots could work as partners, supporting each other during execution of operational tasks. Otherwise, the system "human-robot" will not be able to cope with unforeseen events and emergency situations.

The research is partially supported by the state research № 0073-2014-0005, as well as by the Russian Foundation for Basic Research (projects № 16-37-60100, 16-08-00696, and 14-08-01225).

1. Alferov, G.V. (ed.) Information systems of virtual reality in mechatronics and robotics: Teaching guide / Alferov G.V., Kulakov F.M., Nechaev A.I., Chernakova S.E. St Petersburg: «SOLO», 2006. 146 p.
2. Kryuchkov, B.I. Simulation technologies for ergonomic design of the system «cosmonaut – manipulation robot – environment» / Kryuchkov B.I., Mikhailyuk M.V., Usov V.M. // Conference proceedings "Management in the marine and aerospace systems" (UMAS 2014). St Petersburg, 2014. p. 367-377.
3. Kryuchkov, B.I. The ontological approach to building an interactive virtual environment for a visual representation of the planned actions during the dialog control of the cosmonaut - robotic assistant on the ISS / Kryuchkov B.I., Usov V.M., Karpov A.A. // Open Semantic Technologies for Intelligent Systems (OSTIS-2016): proceedings of the 6th International Scientific and Technical conference. (Minsk, February 18-20 , 2016) / editorial board: V. V. Golenkov (editor-in-chief.) [etal.]. Minsk: BSUIR 2016. pp.477-482.
4. Kryuchkov, B.I. Using the information from the onboard vision systems of mobile robots for visual control of their interaction in the group during on-planet activity of cosmonauts./ B.I. Kryuchkov, M.V. Mikhailyuk, V.M. Usov // Collection of abstracts of Scientific and Technical conference «Technical vision in control systems – 2016. M., 15-17.03.2016. [Electronic resource] URL: http://tvcs2016.technicalvision.ru/file/tezis.pdf open resource 15-17.03.2016.
5. Kryuchkov, B.I. A way of integration of a robot-assistant in joint activities with cosmonauts by "teaching by showing" method. Kryuchkov B.I., Kulakov F.M., Karpov A.A., Nechaev A.I., Usov V.M., Chernakova S.E. // Robotic and technical cybernetics, 2014, Vol. 2 (3) pp. 29-32.
6. Yusupov, R.M. Possibility of Application of Multimodal Interfaces on a Manned Space Complex to Maintain Communication Between Cosmonauts and a Mobile Robotic Assistant. / R.M. Yusupov, B.I. Kryuchkov, A.A. Karpov, A.L. Ronzhin, V.M. Usov // Manned spaceflight. 2013. № 3. pp.23-34.

7. Yuschenko, A.S. Dialog control of robots using fuzzy models // Integrated models and soft computing in artificial intelligence: Proceedings of the 5th International Conference (Colomna, May 28–30, 2009). M.: Fizmatlit, 2009. Vol.1. pp. 97-108.

А.А. Карпов[1], Б.И. Крючков [2], А.Л. Ронжин[1], В.М. Усов[2]

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЧЕЛОВЕК–РОБОТ В СОСТАВЕ ЕДИНОЙ КОМАНДЫ КОСМОНАВТОВ И АВТОНОМНЫХ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ НА ПОВЕРХНОСТИ ЛУНЫ

[1]СПИИРАН, Санкт-Петербург
karpov@iias.spb.su; ronzhin@iias.spb.su
[2]НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина, Звездный городок Моск. обл.
b.kryuchkov@gctc.ru; v.usov@gctc.ru

Аннотация

Вопросы группового взаимодействия интересуют исследователей в разных областях науки. Огромный пласт работ посвящён взаимодействию лиц опасных профессий (летчиков, космонавтов, полярников и др.) в составе экипажа в экстремальной среде, а в последние годы привлекают внимание модели активности групп мобильных роботов. Значительно менее изучены вопросы построения интерфейсов для согласованного функционирования «смешанной» команды людей и роботов. В свете перспективных проектов лунных миссий представляет интерес вопрос, будет ли отвечать требованиям надежности и безопасности единая команда космонавтов и мобильных роботов при напланетной деятельности, когда особенно важно обеспечивать согласованное поведение участников, предупреждать коллизии, рационально расходовать ресурсы и осуществлять взаимную поддержку членов команды в нестандартных и аварийных ситуациях. В статье рассматриваются вопросы построения взаимодействия человек–робот для единых команд людей и роботов, улучшения ситуационной осведомленности человека на базе агентно-ориентированного подхода.

Ключевые слова: единая команда людей и роботов, экстремальная среда, человеко-машинный интерфейс, агентно-ориентированные системы.

Введение

Совместное функционирование в составе единой команды людей (в данном случае рассматривается вариант малой рабочей группы или экипажа) и группы роботов в последние годы привлекает внимание исследователей по нескольким причинам. Главная из них состоит в том, что достигнутые успехи в области создания систем искусственного интеллекта (ИИ) и ряда смежных технологий (компьютерного зрения, синтеза сложных изображений, виртуальной реальности и др.) даёт основание ориентироваться при проектировании человеко-машинной системы «экипаж–группа роботов» на такую степень автономности мобильных роботов, которая позволяет им не только выполнять достаточно сложный по составу действий сценарий, но и самостоятельно ориентироваться в обстановке, обладать способностями адаптироваться к динамически меняющимся условиям среды. Допускаемая сценариями применения на Луне вариативность «поведения» таких роботов в контексте складывающейся обстановки по-новому ставит вопрос о направленности и способах контроля со стороны экипажа группы роботов, как активных агентов. Сегодняшний уровень развития робототехники и систем ИИ все ещё не позволяет исключить человека из системы принятия решений, когда нет полноты данных о ситуации, и, кроме того, не все ситуации при освоении новых сфер обитания могут быть заранее просчитаны и спрогнозированы. Собственно, в этом смысле продолжает оставаться актуальным вопрос о распределении функций в эргатических системах, возникший при уже первом появлении автоматов, но с учетом принятия решений в распределенных системах с включением систем ИИ. Дальнейшие предложения исходят из антропоцентрического принципа организации взаимодействия людей и роботов в составе единой команды: человек ни при каких условиях не должен терять контроль за активностью роботов, особенно в осложненных и нештатных ситуациях, а, напротив, должен быть постоянно включен в такой контроль, чтобы иметь возможность принять нестандартные решения, используя свои когнитивные возможности, превышающие таковые у современных систем ИИ. Именно последнее обстоятельство даёт основание говорить о человеке, как высшем уровне управления в иерархии средств обеспечения взаимодействия, которые должны быть спроектированы для рассматриваемой интегрированной команды.

Для того, чтобы экипаж космонавтов мог оперативно переключиться в режим супервизорного управления одним или несколькими роботами в случае экстренной непредвиденной ситуации, например угрозы коллизии роботов, необходимо изначально проектировать совместное взаимодействие «человек–робот», четко описывая механизмы, которые используются для информирования человека, поддержания у него ситуационной осведомленности и задания команд реальным роботам в наиболее привычных (естественных) формах диалога [6,7]. Трудности дистанционного взаимодействия с автономными мобильными роботами и построения обратной связи для человека о состоянии окружения требует разработки средств информационного обеспечения с применением ряда современных информационных технологий [1-3].

Методология организации взаимодействия единой команды людей и роботов

Многие авторы отмечают возросшую потребность в создании и развитии методологии организации взаимодействия групп интеллектуальных агентов и построения интерфейсов, обслуживающих взаимодействие человек-робот (англ.: Human-Robot Interaction – HRI) в единой смешанной команде людей и роботов. Как одно из возможных решений в данной работе предлагается рассматривать агентно-ориентированное построение HRI, в котором «виртуальные прокси-агенты» от имени реальных интеллектуальных агентов, функционирующих в реальной среде, могут выступать как источники и как потребители передаваемой между участниками командного взаимодействия информации. Этот подход, в известной степени развивающий идеи индуцированной виртуальной реальности, направлен на то, чтобы с использованием замещения реально существующих активных агентов их виртуальными двойниками, способными оперативно собрать обработать, обобщить, адресно доставить и отобразить для потенциального потребителя непротиворечивый состав исходных данных для рационального решения им «своих задач» в пределах «навыков» и делегированных полномочий на основе единого понимания и единой семантической интерпретации текущей ситуации.

Другими словами, помимо реально существующих и инициирующих прямой диалог активных агентов, рассматриваются некоторые «виртуальные агенты» или прокси-агенты реальных носителей искусственного и естественного интеллекта, которые могут обслуживать ход такого взаимодействия, упорядочивать его, информировать участников диалога о ситуации в целом, что исходит из понимания естественных ограничений каждого взятого по отдельности реального агента в отношении сбора информации об окружающей среде, степени решений отдельно взятых задач, составляющих общее задание, требуемых и реально существующих ресурсов и пр.Ключевой особенностью дистанционного управления группой роботов и выполнения задач мониторинга ситуации является то, что люди и роботы, взаимодействуя в команде, координируют свои действия посредством диалога о своих текущих возможностях, ближайших целях и результативности решения предыдущих задач [7,4].

В литературе по проблемам ИИ [7] этот круг методологических проблем рассматривается с позиций нахождения способов порождения единого семантического базиса (например, в форме онтологии), доступного для выражения привычных для человека категорий пространства и времени по отношению к объектам внешней среды в категориях «модели внешнего мира» робота. Эти категории должны составить «каркас языка общения», который предлагается для актуализации мысленного образа у человека, на основе которого он строит свои действия, и выбора оперативных заданий, которые предлагаются к исполнению другим участникам команды.

В общем случае, необходимо предусматривать взаимодействие в проблемной ситуации, когда права инициирования диалога имеют все участники команды для определенного вида проблемных ситуаций. В то же время, реалистичный подход требует, чтобы в построении взаимодействия в команде нашли отражение нормативно заданные уровни иерархии в экипаже и преимущественные области компетенций принятия решений у членов экипажа.

Модель работы в единой команде в условиях напланетной деятельности экипажа

Конкретизация распределения функциональных обязанностей в космическом экипаже имеет большое значение, поскольку применительно к пилотируемой космонавтике огромный перечень выполняемых задач требует выделения специалистов, способных их выполнить с наибольшим эффектом. Другими словами, в группе людей необходимо иметь специалистов, наилучшим образом способных решить тот или иной круг узких специальных задач (операций), например, связанных с управлением транспортным средством, восстановления работоспособности того или иного механизма, погрузочных и монтажных работ и т.д. В реальных полетах, поскольку не приходится говорить о большом числе участников–космонавтов, неизбежны случаи замещения специалистами друг друга, а также дублирования обязанностей в критически важных по соображениям

безопасности ситуациях. Тем не менее, определяя структуру взаимодействия, приходится учитывать, какие связи необходимо предусмотреть в первую очередь и как «перенаправлять» запросы на взаимодействие интеллектуальных агентов, если тот или иной человек перегружен заданиями и не «вписывается» в контекст ситуации и приоритетов выполнения конкретной задачи в свете существующих пространственно-временных ограничений. При этом, понимая, что в основе лежит коллективный сбор данных, желательно применение хорошо продуманной схемы подготовки решения. Своевременный охват всех значимых событий во внешней среде предполагает максимальную активность всех участников взаимодействия в пределах их специализации, компетентности, осведомленности и работоспособности. Здесь также уместно отметить, что люди – участники событий могут и должны различаться по признаку: а) дистанционно участвуют в диалоге, например, подавая команды с пульта управления на рабочем месте и, там же контролируя обстановку, используя электронные индикаторы, или же; б) непосредственно участвуют в режиме внекорабельной деятельности в защитном снаряжении (в скафандрах) в выполнении реальных операций.

Фактически необходимо различать несколько разных фаз во взаимодействии человека и роботов, отдельно рассматривая: 1) фазу сбора и доставки исходных данных для человека с учетом его компетенций и специализации; 2) фазу обработки и представления информации для человека с использованием электронных приборов; 3) фазу подготовки и принятия решений о необходимости вмешательства человека в активность роботов. В этой связи в рассмотрение должны попадать и варианты прямого взаимодействия в связке «один оператор – один робот», когда человек-оператор задает управление роботу, в функциональности которого не предусмотрено выполнение какого-то действия в автоматическом режиме. Известно много вариантов передачи команд от человека роботу, каждый из которых обладает своими преимуществами и недостатками [1]. Как правило, наибольший эффект применения роботов наблюдается в вариантах их способности к широкой автономной активности. Поэтому активно изучается построение автономных систем управления робота, благодаря которым робот действует самостоятельно для достижения цели высокого уровня, а функции человека трансформируются до уровня «внешнего наблюдателя», ведущего мониторинг активности. Автономные системы могут повысить общую производительность системы, например, в случае, когда один космонавт сможет осуществлять взаимодействие с целой группой роботов. В этом случае оперативность вмешательства может потребовать, чтобы коммуникации между человеком и роботом были ограничены узким словарем команд и упрощенным языком общения с приоритетом бесконтактного управления с помощью голосовых и жестовых команд [4,6].

Модель работы в команде применительно к условиям напланетной деятельности экипажа

Необходимо дать краткую характеристику тех предметных задач, которые возлагаются на команду людей и роботов, применительно к которым будут даны некоторые пояснения. В данной работе рассматривается ситуация дистанционного взаимодействия при организации перемещения по поверхности Луны в некоторой контролируемой территориальной зоне мобильных агентов, как автономных роботов, так и космонавтов в защитном снаряжении.

Автономность роботов обеспечивается функционированием ряда бортовых средств, предназначаемых для того, чтобы предоставить информацию о состоянии своих систем, местоположении, ресурсе и пр. Фактически по всем таким видам необходимо предусматривать наличие прокси-агента, способного адресно доставить упорядоченную информацию другим агентам, в том числе, космонавту соответствующей специализации.

Сегодня принято рассматривать следующие виды специализации (ролевые позиции) космонавтов в экипаже: 1) командир экипажа с преимущественными обязанностями выполнения экстренного вмешательства и перехода в режим супервизорного управления конкретным роботом; 2) бортинженер с обязанностями контроля состояния работоспособности роботов, обеспеченности энергетическими ресурсами; 3) штурман с обязанностями контроля позиционирования и составления маршрутов навигации; 4) исследователь с обязанностями выполнения поиска необходимых для принятия решения искусственных объектов и оценки их состояния, организации взаимодействия с роботами на предмет опознания неизвестных предметов и объектов.

Изучаемая модель коллективной работы состоит в том, что каждый агент имеет «набор навыков» и ресурсов, которые они вносят в команду. Агенты – реальные роботы, предназначенные для выполнения этих задач, по мере реализации сценария осуществляют выполнение детального плана, составленного экипажем, а оперативные коррекции осуществляются по результатам мониторинга хода его исполнения. Для изучения основного вида активности группы мобильных агентов – их

перемещения на поверхности Луны при разведке, инспекции и патрулировании территории рассматривается такая основная конфигурация бортовых средств реального робота, которая позволяет ему автономно выполнять позиционирование, собирать сведения о позиционировании ближайших объектов, поддерживать связь с другими агентами (в том числе, в рамках диалога в режиме бесконтактного управления), передавать телеметрические данные в форме, пригодной для внесения исправлений в цифровую карту местности, а также выполнять самотестирование бортовых систем для выявления отказов, препятствующих выполнению задач и коммуникации с членами экипажа.

Значительно сложнее ситуация, когда помощь необходима человеку, особенно, если он непосредственно участвует в передвижении по поверхности Луны. Каждый такой случай должен быть детально рассмотрен и заранее просчитан. В рамках реалистичной модели организации совместной работы реальный робот не способен одновременно обслуживать запросы нескольких людей. Фактически, человек должен ждать, пока робот станет доступным для диалога, а в это время должен быть инициирован виртуальный прокси-робот, который обслуживает запросы на выполнение каких-то действий. Тем самым, с одной стороны, в каждый конкретный момент времени для каждого человека предусматривается возможность осуществлять управление реальным роботом (но только в монопольном режиме с целью исключить конфликты задания команд), но, с другой стороны, по решению командира экипажа и по согласованию между исполнителями работ, одновременно претендующими на инициирование конкретного реального робота, должна быть предусмотрена возможность переключать диалог с реальным роботом между разными пользователями. Это соглашение направлено на достижение необходимой гибкости реагирования в случае быстро меняющейся оперативной обстановки.

Применение агентно-ориентированной архитектуры для взаимодействия в команде

Рассматриваемый способ построения взаимодействия базируется на методологии агентно-ориентированного подхода, которая различает реальных агентов (людей и роботов) и виртуальные средства, выступающие от их имени в цепочках преобразования информации, коммуникации и формирования новых знаний о событиях и реагировании на них членов команды. Реальные агенты действуют в физическом мире. Виртуальные прокси-агенты не могут изменять окружающую среду напрямую, но они предназначены для предоставления расширяющих качество информирования человека набора услуг и/или сервисов. При этом каждый виртуальный агент обладает ограниченными возможностями предоставления услуг и сервисов. В этом смысле они специализированы, но в совокупности предусмотренный (и допускающий расширение) состав должен создавать дружественное информационное окружение и повышать ситуационную осведомленность космонавтов. Например, при отслеживании позиционирования реальных роботов некий прокси-агент может представлять бортовую информацию о позиционировании «оригинала» в исходном виде, без обработки и приведения к какой-то необходимой человеку системе координат, а сами преобразования могут быть предоставлены другими вспомогательными агентами. Такой дизайн HRI способствует гибкости системы. Также можно предусмотреть наличие в цепочке виртуального агента, способного собирать информацию о позиционировании всех реальных мобильных агентов и на этой основе передавать информацию виртуальному агенту («цифровой карте»), что, в свою очередь, инициирует преобразования информации к визуальной форме (2D или 3D) в зависимости от запроса конкретного человека-оператора. Упорядоченная во времени картографическая информация будет доступна всем участникам через систему виртуальных агентов синхронизации информации о событиях во внешней среде для реализации технологии индуцированной реальности при отображении текущей ситуации.

Люди и роботы должны быть в состоянии эффективно общаться с целью обмена знаниями о пространственных отношениях во внешней среде для ведения ориентировки. Следовательно, в средствах ведения диалога и командном языке должны быть предоставлены семантические модели, которые учитывают особенности пространственного мышления человека, базирующиеся на представлениях о «схеме тела» и семантики пространственно-временных отношений, которые позволяют людям использовать такие отношения из естественного языка. Для поддержки ведения пространственной ориентировки человека-участника событий в роли внешнего наблюдателя в цепочке виртуальных агентов должен быть предусмотрен виртуальный агент «Пространственное мышление»с такой специализацией, чтобы иметь возможность ответить на специфические запросы пользователя, какие объекты находятся в окружении конкретного робота в разных системах координат, удобных для человека в том или ином контексте визуального анализа обстановки. Другими словами, вместо того, чтобы пытаться реализовать такое построение «модели внешнего

мира» у реального робота, чтобы роботы были в состоянии понять, как человек воспринимает пространство и взаимное расположение окружающих предметов, предлагается наделить такой способностью специализированного виртуального агента, способного обслужить запросы любого члена команды с учетом реально сложившейся ситуации и состояния модели цифровой карты местности. При этом этот агент должен использовать все виды информации, поступающей по каналам телеметрии с систем компьютерного зрения реальных роботов, но, главное, учитывать реальное положение тела и его ориентацию в пространстве у того агента, который запросил информацию для ведения своей пространственной ориентировки. Очевидно, что для этой цели могут потребоваться средства моделирования реального мира средствами виртуальной и индуцированной реальности и 3D-визуализации, что составляет предмет специальных исследований [4]. В принципе, можно представить себе ситуацию, когда для достижения общности решения необходимо пополнение состава виртуальных агентов «агентом-заместителем» конкретного человека, который представляет информацию о текущих возможностях космонавта в отношении соответствующих знаний, навыков, способности к оперативному реагированию в конкретный момент времени, а также о состоянии здоровья и работоспособности. В наиболее сложных критических случаях желательно, чтобы такую информацию о своем статусе задавал не только сам член экипажа в виде какой-то стандартизированной декларации, а была предусмотрена связь через беспроводную сеть передачи данных с носимой биотехнической системой, имеющей возможность осуществлять сбор информации с датчиков контроля здоровья и работоспособности космонавта, которые уже сегодня предусматриваются для мониторинга при работе в скафандре. В рамках развиваемой методологии логично включить в рассмотрение виртуальные агенты «пользовательских интерфейсов». Когда люди взаимодействуют с роботами, необходимо иметь разные возможности взаимодействия в зависимости от ряда факторов: конфигурация команды (например, характер окружения и удаленность взаимодействия), расположение рабочего места в среде, вид связи, и др. [1,3,6]. В числе таких агентов рассматриваются виртуальные агенты управления с использованием носимых устройств на основе захвата движения [2], различные «агенты бесконтактного управления» (для передачи голосовых и жестовых команд) [1,2,4,7], хотя для стационарных рабочих мест космонавта, очевидно, будут по-прежнему широко использоваться агенты графических пользовательских интерфейсов (GUI), поскольку они могут быть лучше интегрированы с агентами представления визуальной информации для космонавта, выполняющего функции штурмана, диспетчера и инженера-космонавта, ответственных за работоспособность реальных роботов и предотвращение их коллизий во внешней среде, а также с агентами приема и переработки телеметрической информации для построения виртуального агента «цифровая карта» и варианты ее отображения космонавтам. Важно подчеркнуть, что графический интерфейс типа «карта» не только представляет в наглядной форме текущее пространственное распределение активных агентов (людей и роботов), но и отображает статус и информацию о событиях, полученных от каждого агента: задание в процессе выполнения, данные о позиционировании, объекты в ближнем окружении, опасные с точки зрения коллизий, искусственные объекты, пригодные для ориентирования, построения маршрута при навигации и др.

Заключение

В данной работе предпринята попытка описать контуры построения взаимодействия людей и роботов в составе команды, которые могут быть охвачены методологией информационной поддержки на принципах функционирования мультиагентных систем (МАС). Можно констатировать, что независимо от рассмотренных форм взаимодействия, построение системы «человек-робот» в варианте смешанной команды требует, чтобы люди и роботы могли функционировать по «принципу синергии», предотвращения коллизий и избегания разнонаправленных управленческих решений по причине нарушений коммуникации. При этом возможности группы роботов должны быть рассчитаны таким образом, чтобы с большей отдачей выполнять те задачи, которые несут угрозы для организма человека и/или выполняются силами человека (рабочей группы) заведомо менее эффективно. В работе показано, что ключ к решению многих проблем такого рода состоит в преодолении разрыва между естественным и искусственным интеллектом за счет создания промежуточного слоя «посредников» или виртуальных прокси-агентов, которые не только адресно доставляют данные из огромного потока информации и специальным образом ее организуют для отображения человеку, но, главное, способны работать в едином с человеком семантическом базисе, формируя диалог в привычных для человека категориях и формах. Именно такие решения могут продвинуть решение проблемы взаимодействия так, чтобы люди и роботы работали как партнеры, поддерживая друг друга по мере выполнения оперативных задач. В

противном случае, узким местом организации взаимодействия будет неспособность системы «человек-робот» справляться с непредвиденными событиями и нештатными ситуациями.

Исследование выполняется при частичной поддержке бюджетной темы № 0073-2014-0005 и фонда РФФИ (проекты № 16-37-60100, 16-08-00696 и 14-08-01225).

1. Алферов, Г.В. (ред.) Информационные системы виртуальной реальности в мехатронике и робототехнике: Учеб. Пособие / Алферов Г.В., Кулаков Ф.М., Нечаев А.И., Чернакова С.Э. СПб.: «СОЛО», 2006. 146 с.
2. Крючков, Б.И. Технологии моделирования для эргономического проектирования системы «космонавт – манипуляционный робот – рабочая среда» / Крючков Б.И., Михайлюк М.В., Усов В.М. // Материалы конференции «Управление в морских и аэрокосмических системах» (УМАС-2014). СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2014. С.367-377.
3. Крючков, Б.И. Онтологический подход к построению интерактивной виртуальной среды для визуального представления планируемых действий при диалоговом управлении роботом-помощником космонавта на МКС / Крючков Б.И., Усов В.М., Карпов А.А. // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем = Open Semantic Technologies for Intelligent Systems (OSTIS-2016): материалы VI междунар. науч.-техн. конф. (Минск, 18-20 февраля 2016 года) / редкол.: В. В. Голенков (отв. ред.) [и др.]. Минск: БГУИР, 2016. (596 с.) С.477-482.
4. Крючков, Б.И. Использование информации от бортовых систем технического зрения мобильных роботов для зрительного контроля их взаимодействия в группе при напланетной деятельности космонавтов. / Б.И.Крючков, М.В. Михайлюк, В.М. Усов // Сб. тезисов научн.-техн. конф. «Техническое зрение в системах управления – 2016. М., 15-17.03.2016. [Электронный ресурс] URL: http://tvcs2016.technicalvision.ru/file/tezis.pdf доступ свободный 15-17.03.2016.
5. Крючков, Б.И. Включение робота-ассистента в совместную с космонавтами деятельность методом «обучения показом движения» Крючков Б.И., Кулаков Ф.М., Карпов А.А., Нечаев А.И., Усов В.М., Чернакова С.Э. // Робототехника и техническая кибернетика, 2014, Вып. 2 (3) С. 29-32.
6. Юсупов, Р.М. Возможности применения многомодальных интерфейсов на пилотируемом космическом комплексе для поддержания коммуникации космонавтов с мобильным роботом – помощником экипажа. / Р.М. Юсупов, Б.И. Крючков, А.А. Карпов, А.Л. Ронжин, В.М. Усов // Пилотируемые полеты в космос. 2013. № 3. С.23-34.
7. Ющенко, А.С. Диалоговое управление роботами с использованием нечетких моделей // Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте: Сб. тр. V Междунар. науч.-практич. конф. (Коломна, 28–30 мая 2009 г.). М.: Физматлит, 2009. Т.1. С. 97-108.

F.M. Kulakov

METHODS OF THE CREATING OF GROUND-BASED CONTROL COMPLEX FOR THE REMOTE-CONTROLLED SPACE ROBOTS

Federal state budgetary institution of Science of St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences
kufelix@yandex.ru

Abstract

Proposed theoretically and experimentally proved methods of creation of ground-based control complex for the remote-controlled space robots with large delay in the control signaling from the Earth to the local robot control system.

Keywords: Space robot, distance learning, remote control, the robot model, position-force control.

Ф.М. Кулаков

МЕТОДЫ ОРГАНИЗАЦИИ НАЗЕМНОГО УПРАВЛЯЮЩЕГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ТЕЛЕУПРАВЛЯЕМЫХ КОСМИЧЕСКИХ РОБОТОВ

Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН (СПИИРАН),Санкт-Петербург
kufelix@yandex.ru

Аннотация

Предложены теоретически и экспериментально обоснованы методы телеуправления космическими роботами при больших запаздываниях в передаче управляющих сигналов с Земли к локальной системе управления робота. Данные исследования поддержаны фондом РФФИ (проекты 16-07-01277-а, 14-08-01225-а, 15-07-04415-а, 15-01-02021-а).

Ключевые слова: космический робот, дистанционное обучение, телеуправление, модель робота, позиционно-силовое управление.

1. Введение

Известный подход к организации телеуправления космическим роботом (КР) [1] предполагает использование на наземном центре управления КР моделей робота и его внешней среды, а также средств обучения робота требуемым действиям в Космосе. Возможным средством обучения может служить задающая рукоятка с отражением усилий, с помощью которой человек, осуществляя управление моделью робота, в копирующем режиме производит выполнение нужной операции.

Траектория изменения в пространстве и времени вектора положения рабочего инструмента модели робота и закон изменения во времени вектора силы взаимодействия инструмента с объектами модели внешней среды в случае, если возможные перемещения объектов ограничены механическими связями, могут быть использованы в качестве программных сигналов для локальной системы управления КР.

Передача этих сигналов реальному КР осуществляется после предварительной проверки их действия на модели робота, в локальную систему управления которого они вводятся в качестве программных значений вместо управляющих сигналов от задающей рукоятки, получаемых во время обучения.

В случае достаточной точности наземных моделей шансы на выполнение КР требуемых действий при качественной отработке переданных программных сигналов оказываются достаточно высокими, и следовательно, независимо от величины запаздывания задача телеуправления успешно решается.

К сожалению, на практике неизбежна неидеальность моделей. Это может привести к ошибочному функционированию робота и возможному срыву выполнения требуемой операции. Для уменьшения ошибок до допустимого уровня, наряду с программными сигналами, необходимо формировать и передавать в локальную систему управления КР дополнительную информацию. На ее основе должны быть сформированы сигналы коррекции, которые в конечном счете обеспечат успешное функционирование робота.

Для получения дополнительной информации необходимо использование разнообразных сенсоров, которыми должны быть оснащены модель космического манипулятора (КМ) и его рабочий инструмент. Ими могут быть локационные, силомоментные, тактильные сенсоры, а также TV-камеры, необходимые для реализации системы технического зрения. Формирование корректирующих сигналов требует также использования аналогичной текущей дополнительной информации, получаемой в процессе выполнения КР нужной операции с помощью сенсоров, идентичных сенсорам модели робота, и расположенных на нем таким же образом, как и на модели.

Поскольку вышеупомянутая дополнительная информация есть результат функционирования сенсорной системы робота, в дальнейшем будем именовать ее «сенсорным образом». Корректирующий сигнал является функцией величины рассогласования между «модельным» и реальным сенсорными образами. Он обращается в ноль при «нулевом» рассогласовании между ними. Простейшим примером сенсорного образа могут быть изображения множества характерных точек, принадлежащих предметам модели внешней среды робота. Например, ими могут быть изображения вершин многогранников (рис. 1). Из изображения внешней среды, полученной с помощью TV-камер, расположенных на модели рабочего инструмента, они выделяются специальной «распознающей программой». Изображения аналогичных точек реальной внешней среды формируются на стадии выполнения роботом программной траектории с помощью TV-камер, расположенных на реальном рабочем инструменте, точно так же, как и на его модели. Поэтому, при идеальном выполнении плана, изображения этих точек должны совпадать с изображениями «модельных» точек. Однако, в действительности из-за возможной неточности модели внешней среды они не совпадают. Рассогласования позиций изображений характерных модельных и соответствующим им реальных точек используются для формирования величины коррекции положения рабочего инструмента КМ при воспроизведении программы его системой управления. Сенсорными образами могут быть и «силовые» образы, получаемые с помощью запястных силомоментных сенсоров робота и его модели. Результатом обработки этих сигналов являются векторы сил взаимодействия модели рабочего инструмента КМ с моделями объектов его

внешней среды, которые имеют связи. Сигналы рассогласования модельных и реальных векторов сил взаимодействия трансформируются системой управления КР в дополнительные смещения его рабочего инструмента, приводящие к устранению ошибочной силы взаимодействия.

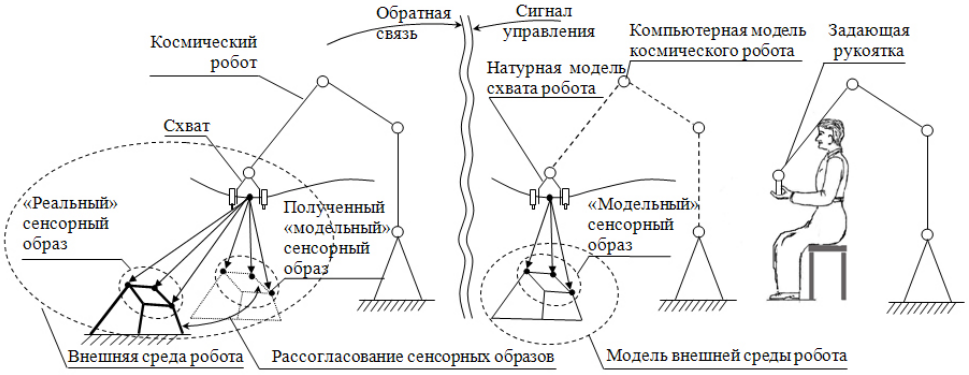


Рисунок 1 –Схема дистанционного управления космического робота

Более детальное рассмотрение способа коррекции приведено в [1-6], в данной статье сосредоточим внимание на наземной модели КР и средствах обучения действиям в Космосе, т.е. средствам, с помощью которых формируются программные траектории для локальной системы управления, а именно законы изменения во времени векторов требуемых положения рабочего инструмента робота и силы и момента взаимодействия его с объектами внешней среды.

2. Наземная модель космического робота

Идеальной моделью робота мог бы быть он сам, при условии компенсации действия на его подвижные элементы сил гравитации путем добавления в закон управления роботом дополнительного слагаемого, благодаря которому приводы робота формируют дополнительные силовые воздействия, уравновешивающие гравитационные.

Однако, в ряде случаев использование в качестве модели реального робота невозможно, так как конструкция робота и его приводы не рассчитаны на функционирование в условиях гравитации. Это обычно имеет место для манипуляционных роботов больших размеров. Рациональным выходом из положения является создание так называемой комбинированной модели робота, включающей реальную и виртуальную части (рис.2). В качестве виртуальной части используется исполнительный орган КР без рабочего инструмента на его конце. В качестве реальной - рабочий инструмент, точнее его натурная модель. Для реалистичности визуального восприятия применяется технология дополненной реальности (AugmentedReality), когда реальный объект – модель рабочего инструмента дополняется виртуальным объектом - частью исполнительного органа (манипулятором) без его рабочего инструмента.

Виртуальная часть модели формируется на базе одного из специализированных пакетов прикладных программ, например WEBOTS. Ее визуализация может быть осуществлена с помощью библиотеки OPENGL. Перемещение натурной модели рабочего инструмента осуществляется специальным механизмом-манипулятором. Закон перемещения формирует виртуальная часть модели. В качестве программы он используется контроллером механизма-манипулятора и отрабатывается им. Динамические и кинематические характеристики механизма-манипулятора должны быть достаточны для качественной отработки программы.

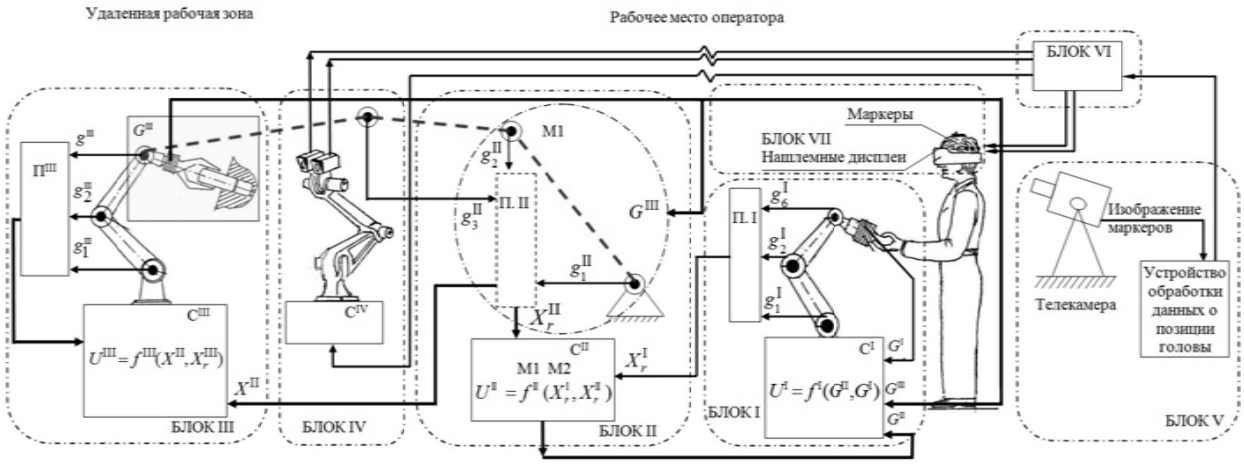


Рисунок 2 – Обобщенная структура аппаратно-программной части

3. Наземные средства обучения космического робота

3.1. Обучение в процессе управления наземной моделью космического робота

Для реализации обучения КР в рассматриваемом случае используется система «задающая рукоятка-модель КР». Задающая рукоятка перемещается рукой человека с помощью держателя, закрепленного на конце рукоятки (блок 1, рис. 2). Задающая рукоятка, по существу, является управляемым манипулятором. Закон управления приводами рукоятки должен, во-первых, обеспечить свободное перемещение держателя на конце рукоятки по всем 6-ти пространственным координатам, причем вектор положения держателя должен отслеживаться рабочим инструментом управляемого рукояткой робота. Во-вторых, этот закон должен обеспечивать формирование на держателе вектора силы и момента, равного вектору силы и момента взаимодействия рабочего инструмента робота с объектами внешней среды.

Одно из очевидных решений – сделать закон управления рукоятки:

$$U^{\mathrm{I}} = k\left(g^{\mathrm{II}} - g^{\mathrm{I}}\right) - k_V \dot{g}^{\mathrm{I}} + D^{\mathrm{I}} = \quad (1)$$

и закон управления моделью робота:

$$U^{\mathrm{II}} = -k\left(g^{\mathrm{II}} - g^{\mathrm{I}}\right) - k_V^{\cdot} g^{\mathrm{II}} + D^{\mathrm{II}} \quad (2)$$

полностью идентичными, отличающимися только знаком пропорционального слагаемого.

Через $\dot{g}^{\mathrm{I}}$, $\dot{g}^{\mathrm{II}}$ – обозначены управляемые обобщенные координаты и их скорости, k, k_V – симметрические положительно определенные матрицы, D^{I}, D^{II} – дополнительные слагаемые, уравновешивающие силы гравитации, M, m – массы звеньев модели робота-рукоятки, M_C, m_{CX} – массы модели схвата-держателя, e^{I}, e^{II}, $e_{\text{ч}}$ – упругие деформации модели робота, рукоятки и модели руки человека.

Динамический анализ системы «задающая рукоятка-модель робота», схема которой представлена на рис. 3, приведен в [1]. Результатом анализа было нахождение условия устойчивости системы, которое сводится к требованию симметричности и положительной определенности матриц усиления k, k_V.

Существенным ограничением рассмотренного средства формирования программных траекторий для реального КР является ограниченная мощность, которую может развить модель робота и сам КР. Она не может превысить мощность, которая развивается рукой человека, перемещающего задающую рукоятку в процессе формирования программной траектории для реального робота.

Один из возможных способов практической реализации описанного подхода основан на использовании идентичных чисто механических конструкций задающей рукоятки и модели манипулятора без применения специальных приводов для каждой из степеней подвижности. Вместо приводов каждая из степеней подвижности приводится в движение непосредственно рукой человека. С этой целью он перемещает задающую рукоятку. Каждая степень подвижности последней связана с идентичной степенью подвижности модели манипулятора с помощью силового сельсина. Благодаря этому, перемещение степени подвижности приводит во вращение входной вал сельсина, который электромагнитным способом передает вращение соответствующей степени подвижности модели манипулятора. В результате манипулятор двигается точно так же, как задающая рукоятка. Величина крутящего момента манипулятора пропорциональна разности углов поворота между входным и выходным валами сельсина. Очевидно, коэффициент пропорциональности играет роль коэффициента

жесткости пружины. Нетрудно показать, что описание динамики поведения системы задающая рукоятка-манипулятор идентично предыдущему описанию, в котором роль коэффициентов усиления k в законах управления играет роль «жесткости» сельсинной связи. Вышеприведенному описанию полностью соответствует, например, электромеханический манипулятор типа МЭМ, [7] он может быть использован в качестве средства обучения КР.

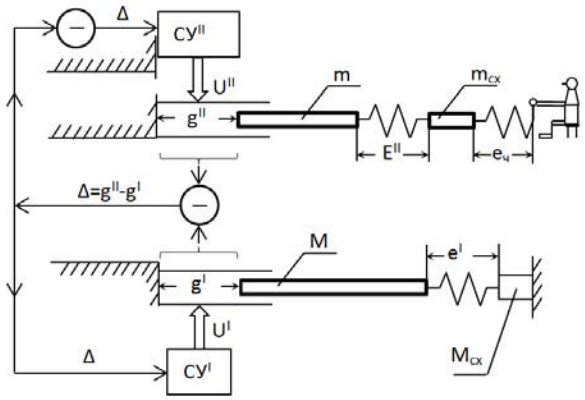


Рисунок 3 –Схема системы «задающая рукоятка-модель робота» (одномерный вариант)

3.2. Обучение, не требующее использования точной наземной модели КР

Возможны подходы к формированию программы выполнения КР действий, которые не требуют использования системы копирующего управления моделью робота. Один из них предполагает использование задающей рукоятки, перемещаемой человеком с помощью специального держателя (очувствленной перчатки, одеваемой на кисть человека, и выполненной в виде натурной модели схвата КР). Перчатка жестко связана с концом рукоятки. Ее пальцы оснащены тактильно-силовыми сенсорами, с помощью которых можно получить информацию о силе взаимодействия руки с объектом внешней среды и вычислить по ней результирующую силу взаимодействия руки с перемещаемым ею мобильным объектом внешней среды, возможные перемещения которого ограничены связями. Эта информация является программой для КР. Другая группа сенсоров формирует информацию о положении пальцев перчатки. Свободное перемещение рукой человека держателя-перчатки на конце рукоятки по всем шести пространственным координатам обеспечивается выбором соответствующего закона управления приводами рукоятки.

Этот закон $U = k_c\left(G_{\text{зад}} - G\right)$ является пропорциональным законом по вектору силы G, измеряемым запястным силомоментным датчиком рукоятки, причем вектор задаваемой силы $G_{\text{зад}}$ равен нулю.

Суставные датчики положения рукоятки формируют информацию, по которой вычисляется пространственное положение держателя-перчатки, используемое для формирования программной траектории для КМ.

Для того, чтобы при выполнении рукой человека требуемой операции на наземном управляющем комплексе скорости и ускорения изменения пространственного положения руки не выходили за пределы, при которых система управления КМ не способна их отработать, на наземном комплексе управления должна быть использована модель КР. Выходом ее являются предупреждающие сигналы, информирующие человека, перемещающего задающую рукоятку, о приближении к граничным допустимым значениям скорости и ускорения.

Модификацией вышеизложенного подхода является подход, не требующий использования задающей рукоятки. Вместо нее для измерения пространственного положения перчатки используется система акселерометров, связанная с перчаткой. Пространственное положение перчатки определяются с помощью вычислителя, производящего двойное интегрирование измеренных ускорений. В отличие от предыдущего способа в данном случае требуется обязательная калибровка положения перчатки с целью определения начальных условий, необходимых для интегрирования.

1. Кулаков Ф.М. Телеуправление космическими роботами // Изв. РАН. ТиСУ. 2016.
2. F. Kulakov, S. Chernakova. Information Technology for Interactive Robot Task Training Through Demonstration of Movement //Yuriy P. Kondratenko (Editor), Richard J. Duro (Editor). Advances in Intelligent Robotics and Collaborative Automation. (River Publishers Series in Automation, Control and Robotics). Danmark. Aalborg. 2015. PP. 95-122.

3. Крючков Б.И., Усов В.М., Кулаков Ф.М., Чернакова С.Э. Построение "тренажера-интерфейса" как способ планирования телеуправления манипуляционным роботом // Труды XII всероссийского совещания по проблемам управления ВСПУ-2014. Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. 2014. С. 3991-3997.
4. Kulakov F.M., Chernakova S.E. Intelligent method oof robots teaching by show. // Всборнике: Proceedings of the 2013 IEEE 7th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems, IDAACS 2013 2013. С. 935-940.
5. Кулаков Ф.М., Чернакова С.Э. Информационная технология обучения роботов показом движений. Ч. I. Концепция и принципы моделирования движений. Мехатроника, автоматизация, управление. 2008. № 7. С. 23-28.
6. Кулаков Ф.М., Чернакова С.Э. Ч. II. Алгоритмы и реализация модели формы движения. Мехатроника, автоматизация, управление. 2008. № 8. С. 24-29.
7. Комраков В.М., Серебряков Б.А., Сорокин Б.В.Разработка и производство копирующих манипуляторов для объектов атомного энергопромышленного комплекса России. Атомная наука и промышленность, http://refdb.ru2004г.
8.

L.A. Martynova, A.I. Mashoshin

FEATURES OF EVALUATING THE PERFORMANCE OF AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE IN EMERGENCY SITUATIONS

Concern CSRI Elektropribor, Saint-Petersburg
martynowa999@bk.ru, aimashoshin@mail.ru

Abstract

The paper discusses effectiveness evaluation of autonomous robotic systems with considering emergency situations caused by both external and internal reasons. The paper discusses the causes of incidents and contains the illustrative example of the effectiveness evaluation on the example of autonomous underwater vehicle.

Keywords: effectiveness evaluation, autonomous underwater vehicle, emergency situations, autonomous underwater vehicle.

Л.А. Мартынова, А.И. Машошин

ОСОБЕННОСТИ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АВТОНОМНЫХ НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ В НЕШТАТНЫХ СИТУАЦИЯХ

АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург
martynowa999@bk.ru, aimashoshin@mail.ru

Аннотация

Описаны особенности оценки эффективности автономных РТК с учетом нештатных ситуаций, вызванных как внешними, так и внутренними причинами. Приведен иллюстративный пример реализации методики учета нештатных ситуаций на примере автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА), являющегося на сегодняшний день наиболее сложным РТК в силу существенных физических ограничений его функционирования.

Ключевые слова: оценка эффективности, автономные РТК, нештатные ситуации, автономный необитаемый подводный аппарат

Введение

Проектирование робототехнических комплексов (РТК) сопровождается, как правило, выполнением оценки эффективности разрабатываемых образцов РТК. Исследование эффективности является важным этапом работ в создании образцов РТК. При системном подходе эти исследования уже на ранних этапах проектирования позволяют:

- определить перспективные направления развития образца РТК;
- выбрать оптимальные сочетания тактико-технических характеристик;
- выработать требования к подсистемам образцов РТК;
- обосновать облик РТК;
- выбрать технические решения;

- выбрать алгоритмы поведения АНПА;
- провести сравнительный анализ различных вариантов РТК.

Таким образом исследования оценки эффективности дают возможность скоординировать, с одной стороны, требования, предъявляемые к разрабатываемому РТК со стороны заказчика, и с другой стороны, возможности, обеспечиваемые разработчиками РТК.

При проведении исследований результаты оценки эффективности выполнения миссии зависят как от особенностей образца РТК, так и от принятых при оценке эффективности условий и допущений. Как правило, при проведении оценки эффективности формируются типовые условия, позволяющие оценить пригодность образца РТК для выполнения миссии при функционировании его в штатном режиме. Однако на практике в реальных условиях возможно возникновение нештатных ситуаций, попадание образца РТК в которые может привести к существенным отклонениям поведения РТК от запланированного вплоть до полного выхода образца РТК из строя. Отсутствие учета этих ситуаций на этапе проектирования РТК приводит к завышенным оценкам, возможному выбору ошибочных технических решений и неспособности изготовленного образца РТК в реальных условиях эффективно выполнять миссию, в том числе и при возникновении нештатных ситуаций. В связи с вышесказанным актуальным является определение степени влияния нештатных ситуаций на эффективность функционирования образца РТК при выполнении миссии.

Целью настоящей работы является проведение исследований, направленных на оценку влияния учета нештатных и аварийных ситуаций на эффективность функционирования образца РТК морского базирования – автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА) [1-9].

Особенности функционирования РТК морского базирования

К РТК морского базирования, в особенности - к автономным необитаемым подводным аппаратам (АНПА) - предъявляются наиболее жесткие требования по сравнению с РТК воздушного и наземного базирования, поскольку отличительными особенностями АНПА являются следующие:

- АНПА представляет собой автономное безэкипажное средство, предназначенное для функционирования в автоматическом режиме, решая задачи, соизмеримые по сложности с задачами, решаемыми экипажными средствами;
- ограниченные размеры АНПА накладывают жесткие ограничения на массогабаритные характеристики размещаемой на АНПА аппаратуры (в том числе на размеры и массу гидроакустических антенн) и, как следствие, на производительность вычислительных средств;
- функционирование АНПА осуществляется в условиях жестких физических ограничений:
  - по точности автономной подводной навигации;
  - по дальности и скорости звукоподводной связи с взаимодействующими силами;
  - по энергопотреблению.

В процессе выполнения миссии возникновение аварийных и нештатных ситуаций обусловлено как внутренними, так и внешними причинами. К внутренним причинам относятся частичные или полные неисправности устройств и механизмов АНПА, выход из строя которых приводит к ограничениям функциональных возможностей АНПА при выполнении миссии. К внешним причинам относятся внезапные и случайные возникновения препятствий, подвижных и неподвижных объектов, в том числе с использованием противодействия или с враждебными намерениями.

Основными показателями эффективности функционирования АНПА являются:

- вероятность успешного выполнения миссии;
- вероятность выполнение миссии в пределах заданного промежутка времени;
- вероятность отклонения положения АНПА от заданного в пределах допустимого.

Нештатные ситуации: причины возникновения и их преодоление

Попадание АНПА в сильное течение, имеющее скорость выше среднестатистической, приводит к отклонению АНПА от маршрутной траектории, превышающему допустимое, в результате чего постоянно требуется корректировка положения АНПА по результатам обсервации. Проведение обсервации, в свою очередь, требует от АНПА дополнительных временных и энергетических затрат.

Внезапное появление движущегося со случайной скоростью объекта (например, айсберга произвольной формы и размера) приводит к необходимости его обхода путем маневрирования по курсу. Успешность обхода объекта определяется радиусом циркуляции АНПА при выполнении маневра уклонения, зависящего, в свою очередь, от скоростного режима движения АНПА. Обход препятствия, изменение скоростного режима и маневрирование по курсу также приводит к дополнительным незапланированным в миссии временным и энергетическим затратам.

Появление объектов, использующих средства активного и пассивного противодействия, маневр уклонения, требуют от АНПА дополнительных усилий по нейтрализации противодействия, что влечет

за собой снова дополнительные временные и энергетические затраты. И, наконец, агрессивные намерения со стороны встретившегося на пути следования АНПА объекта требуют активных мер противодействия, усложняющих возможность выполнения задач, поставленных в миссии.

Описанные ситуации не являются штатными, и отсутствие их учета при проведении оценки эффективности АНПА может привести к завышенным характеристикам АНПА и ошибочному прогнозированию выполнения миссии. Для определения степени влияния учета нештатных и аварийных ситуаций при оценке эффективности функционирования АНПА рассмотрим два варианта оценки эффективности: без учета нештатных ситуаций и с учетом нештатных ситуаций.

Проведение численного эксперимента

Рассматриваемая миссия заключалась в переходе АНПА из точки старта в целевую точку, расположенную на определенной дистанции от точки старта. Особенность тактического эпизода заключалась в том, что положение целевой точки с течением времени корректировалось сторонними средствами в то время, пока АНПА осуществлял переход к целевой точкой. Пусть перед исследователями поставлена задача определения времени, необходимого для достижения целевой точки. Определение времени позволяет в дальнейшем прогнозировать параметры проведения миссии: точно рассчитать момент старта АНПА с донного причального устройства, необходимый для перехода энергоресурс и время в пути.

Время прибытия АНПА в целевую точку определяется, с одной стороны, возможностями АНПА, а с другой стороны - актуальностью выполнения задачи в определенный интервал времени, так как более раннее или позднее выполнение задачи может потерять всякий смысл. Например, для выполнения определенной миссии может оказаться, что необходимы дополнительные силы сопровождения или обеспечения, работа которых ограничена временем прибытия в указанный район. В заданном районе интересующий АНПА объект может иметь ограничение по времени нахождения, после чего либо он перестает находиться в этом районе и исчезает в неизвестном направлении, либо его целеуказание теряет требуемую точность, либо с течением времени объект перестает представлять интерес ввиду изменения общей обстановки.

Для того, чтобы убедиться, насколько необходим учет нештатных ситуаций при оценке эффективности функционирования АНПА, исследования проведем в два этапа. На первом этапе получим оценку эффективности функционирования АНПА для осуществления прогноза временных и энергетических затрат. На втором этапе проведем контрольный эксперимент выполнения миссии с использованием прогнозируемых параметров.

Оценка эффективности функционирования АНПА проводилась с использованием разработанных ранее авторами подходов к оценке эффективности АНПА [10-20] на основе метода статистических испытаний (метода Монте-Карло) и имитационной системы [21]. Оценка эффективности проводилась для двух вариантов: первый - без учета возникновения нештатных ситуаций и второй - с учетом возникновения нештатных ситуаций. Рассматривались нештатные ситуации, связанные с внезапным появлением движущихся со случайной скоростью объектов, например, айсбергов случайного размера, требующие их обхода.

В ходе проведения исследований предполагалось, что АНПА заранее неизвестны следующие параметры:

- размер препятствия;
- местоположение препятствия;
- плотность появления препятствий;
- частота появления препятствий;
- направление движения препятствия.

В качестве исходных данных были заданы:

- положение точки старта АНПА;
- скорость АНПА;
- курс АНПА;
- маршрут, состоящий, для простоты, из одного участка.

Случайным являлись положение целевой точки, в которую должен прибыть АНПА; положение целевой точки разыгрывалось равновероятно в пределах заданного интервала.

Размер и положение препятствия разыгрывались равновероятно. Обнаружение препятствия осуществлялось системой освещения обстановки (СОО). Дальность обнаружения СОО зависела от скорости движения АНПА и от характеристики окружающей среды. Успешность обхода препятствия определяется положением АНПА в момент обнаружения, его маневренными характеристиками и

характеристиками самого препятствия. Предполагалось, что для обхода препятствия АНПА использовал волновой алгоритм.

Результаты моделирования приведены на рисунке 1. Пунктирная линия соответствует эффективности функционирования АНПА без учета возникновения случайных препятствий, сплошная линия соответствует варианту учета возникновения препятствий при оценке эффективности функционирования АНПА.

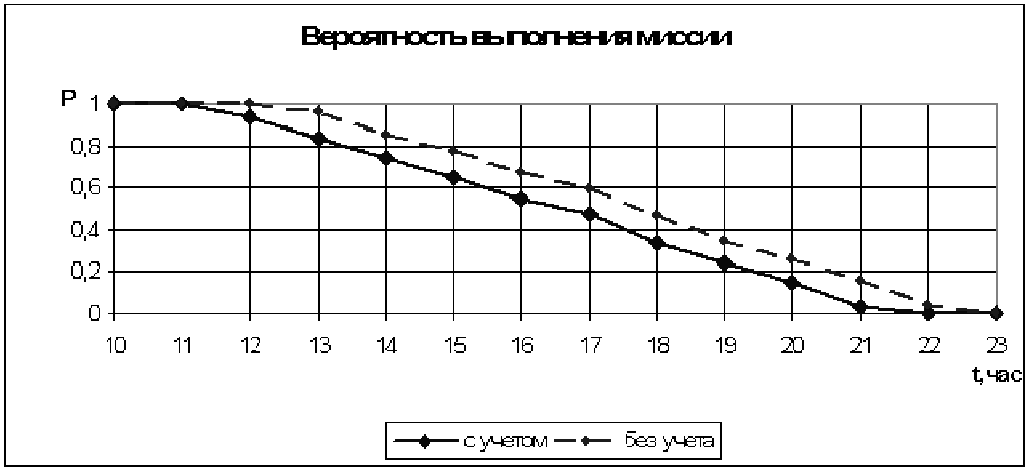


Рисунок 1 – Результаты оценки эффективности функционирования АНПА при прогнозировании времени прибытия в целевую точку

Из рисунка 1 видно, что при отсутствии учета нештатных ситуаций прибытие АНПА в целевую точку произойдет к 13-му часу выполнения миссии, а при учете возникновения нештатных ситуаций для прихода АНПА в целевую точку потребуется не менее 15 часов. Полученные результаты рассматривались в качестве ориентиров при проведении второго этапа исследований: при этом предполагалось, что исходя из полученных результатов прогнозируется время прибытия АНПА в целевую точку.

На втором этапе исследований проводилась оценка эффективности функционирования АНПА при выполнении миссии, заключающейся в прибытии в целевую точку к заданному моменту времени, значение которого было определено на предыдущем этапе исследований.

Результаты оценки эффективности для двух вариантов (первый – учет возникновения нештатных ситуаций, второй – отсутствие учета) приведены на рисунке 2.

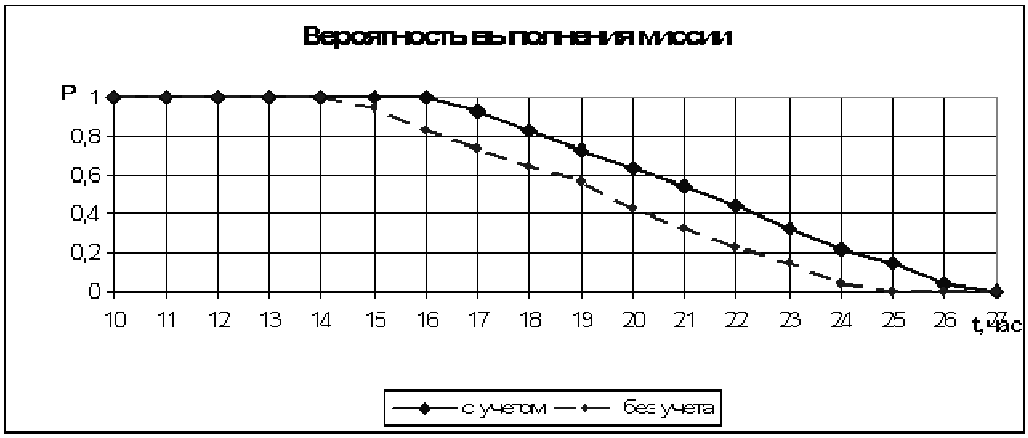


Рисунок 2 – Оценка эффективности функционирования АНПА при прибытии АНПА в целевую точку к заданному моменту времени

Результаты , представленные на рисунке 2, показывают, что вероятность успешного выполнения миссии АНПА «второго варианта» выше, чем у АНПА «первого варианта»: на некоторых дистанциях превышение по вероятности успешного выполнения миссии достигает 0,2. Причиной такого результат является то, что при отсутствии учета возникновения нештатных ситуаций были приняты завышенные характеристики, в результате чего при моделировании выполнения миссии оказалось, что АНПА не всегда успевает прибыть в целевую точку к требуемому моменту времени. Результаты, приведенные на

рисунке 2, показывают, что учет возникновения нештатных ситуаций при оценке эффективности функционирования АНПА при прогнозировании параметров выполнения миссии приводит к повышению эффективности выполнения миссии.

Таким образом, результаты проведенного численного эксперимента показали необходимость учета возможного возникновения нештатных ситуаций при оценке эффективности функционирования АНПА в процессе выполнения миссии.

Заключение

Отличительные особенности АНПА как безэкипажного средства освоения океана, потребовали формирования подходов к оценке эффективности функционирования АНПА, связанных с необходимостью учета наряду со штатными условиями выполнения миссии - возникновения нештатных ситуаций.

Предложенные в работе подходы к оценке эффективности функционирования АНПА, наряду с традиционными условиями выполнения миссии, предусматривают возможность появления нештатных ситуаций: внезапное возникновение препятствий, течений и т.д., приводящих к отклонению от запланированного хода выполнения миссии вплоть до возникновения аварийных ситуаций. При этом весь цикл оценки эффективности функционирования АНПА: формирования основных и вспомогательных показателей эффективности, обоснования критериев эффективности, разработки имитационной системы моделирования функционирования АНПА и метода расчет показателей эффективности - был дополнен формированием и учетом возникновения нештатных ситуаций.

На примере воспроизведения внезапного возникновения в процессе выполнения миссии препятствий показано, как их влияние сказывается на прогнозировании параметров выполнения миссии, и как прогнозируемые данные оказывают влияние на эффективность функционирования АНПА при его эксплуатации.

Работа выполнена при поддержке Российского Фонда фундаментальных исследований (проект № 15-08-02907-а).

1. Автономные подводные роботы. Системы и технологии / Под ред. Агеева М.Д.. – М.: Наука, 2005.
2. Инзарцев А.В. и др. Применение автономного необитаемого подводного аппарата для научных исследований в Арктике. Подводные исследования и робототехника, 2007, №2(4), с.5-14.
3. Гизитдинова М.Р., Кузьмицкий М.А. Мобильные подводные роботы в современной океанографии и гидрофизике. – Фундаментальная и прикладная гидрофизика, 2010, том 3, №1, с.4-13.
4. Боженов Ю.А. Использование автономных необитаемых подводных аппаратов для исследования Арктики и Антарктики. – Фундаментальная и прикладная гидрофизика, 2011, том 4, №1, с.4-68.
5. Millar G., Mackay L. Maneuvering under the ice. – Sea technology, 2015, vol. 56, No. 4, pp.35-38.
6. Илларионов Г.Ю., Сиденко К.С., Бочаров Л.Ю. Угроза из глубины: XXI век.- Хабаровск: КГУП "Хабаровская краевая типография", 2011. - 304с.
7. Белоусов И. Современные и перспективные необитаемые подводные аппараты ВМС США. – Зарубежное военное обозрение, 2013, №5, с.79-88.
8. Викторов Р.В., Илларионов Г.Ю., Квашнин А.Г.Двойное применение автономных необитаемых подводных аппаратов типа "REMUS". – Двойные технологии, 2010, № 3.
9. Кузьмицкий М.А., Гизитдинова М.Р. Мобильные подводные роботы в решении задач ВМФ: Современные технологии и перспективы. – Фундаментальная и прикладная гидрофизика, 2011, том 4, №3, с.37-48.
10. Мартынова Л.А. Имитационная модель оценки эффективности функционирования АНПА // Материалы Первой международной конференции "Судостроение и океанотехника (NAOE-2016)" 06-08 июня 2016г, г. Санкт-Петербурге, 2016, с.52.
11. Мартынова, Л.А. Математическая модель оценки эффективности поиска ПЛ-цели / Л.А. Мартынова. // Судостроительная промышленность. – Сер.V. – Вып.8. – 1989. – С.14-21.
12. Мартынова, Л.А. Разработка системы имитационных и аналитических моделей и модельные исследования влияния состава и параметров системы самонаведения ПМО" / Л.А. Мартынова, Г.С. Малышкин, А.Н. Шебалов // Судостроительная промышленность. – Сер.V. – Вып.15. – 1996. – С.32-42,.
13. Мартынова, Л.А. Отображение информации при оценке эффективности ПМО / Л.А. Мартынова // Судостроительная промышленность. – Сер.V, – Вып.17. – 1998. – С.34-41,.
14. Мартынова, Л.А. Программно-аппаратный комплекс имитационного моделирования и отображения боевых действий / Л.А. Мартынова, В.А. Новаков // Системный анализ при создании

и применении кораблей, вооружения и военной техники. – Вып.14. – Научно-тематический сборник (труды ВМА им. Кузнецова). – СПб.: ООО «НИЦ «Моринтех». – 2003. – С.171-179.
15. Мартынова, Л.А. Разработка адаптивного алгоритма поиска в условиях комплексного использования СГПД / Л.А. Мартынова, А.Н. Луцкий, В.А. Новаков // Системный анализ при создании и применении кораблей, вооружения и военной техники. – Вып.14. – Научно-тематический сборник (труды ВМА им. Кузнецова). – СПб.: ООО «НИЦ «Моринтех». – 2003. – С.195-201.
16. Мартынова, Л.А. «Программно-аппаратный комплекс моделирования и отображения боевых действий» / В.А. Новаков, Л.А. Мартынова // Межотраслевая научн.-техн. конф. СПб.: ГНЦ ГУП ЦНИИ «Гидроприбор», ФГУП «НИИ МОРСКОЙ ТЕПЛОТЕХНИКИ», ГУП ЗАВОД «ДВИГАТЕЛЬ». – 2000. – С.52-53.
17. Мартынова Л.А. и др. Единая система исходных данных – типовые тактические ситуации – методика оценки эффективности ПМО (ЕСИД-ТТС-МОЭ), СПб.: ЦНИИ «Гидроприбор», 1989. – 311с.
18. Мартынова, Л.А. Имитационная модель оценки эффективности обнаружения нарушителя периметровым охранным комплексом / Л.А. Мартынова, А.В. Корякин, К.В. Ланцов, В.В. Ланцов // Приложение к журналу «Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук». – 2012. – Т.4 «Военно-морской Флот России». – С. 376-384.
19. Мартынова, Л.А. Оценка эффективности охраны военных объектов с использованием имитационного моделирования / Л.А. Мартынова // Приложение к журналу «Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук». – 2011. – Т.5 «Спецвыпуск». – С. 213-222.
20. Мартынова, Л.А. Имитационная модель оценки функциональной эффективности охранной системы в условиях применения противодействия / Л.А. Мартынова // Перспективы науки. – 2013. – №5. – С. 46-48.
21. Мартынова Л.А., Машошин А.И., Пашкевич И.В. и др., Программно-аппаратный комплекс для моделирования функционирования АНПА и его составных частей в процессе выполнения миссии. – Материалы 10-й Всероссийской научно-практической конференции "Перспективные системы и задачи управления", Домбай, 2015, с.195-204;

A. Lukashin, V. Zaborovsky, L. Laboshin

DATA ANALYSIS FOR NETWORK CYBER-SECURITY WITH THE BIG DATA PROCESSING TECHNOLOGIES

Peter the Great St.-Petersburg Polytechnic University; CRDI RTC, Saint-Petersburg
lukash@neva.ru, vlad@neva.ru, laboshinl@neva.ru

А.А. Лукашин, В.С. Заборовский, Л.Ю. Лабошин

ОБЕСПЕЧЕНИЕ КИБЕРБЕЗОПАСНОСТИСЕТЕВОГО ТРАФИКА С ПОМОЩЬЮ ТЕХНОЛОГИЙ ОБРАБОТКИ БОЛЬШИХ ДАННЫХ

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого;
ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург
lukash@neva.ru, vlad@neva.ru, laboshinl@neva.ru

В связи с постоянным ростом и развитием информационных и телекоммуникационных технологий непрерывно увеличиваются объемы передаваемой информации по сети Интернет. Одновременно с обработкой и передачей информации остро встает вопрос ее защиты. На основе анализа содержимого, а также статистики сетевого трафика можно идентифицировать различные действия в сети и получить информацию об устройстве программ, информационных систем и сетей. Однако при пропускной способности сетевого канала в 10 Гбит/с за 12 ч будет передано в одну сторону более 50 ТБ информации. Обработка такого объема информации не может быть произведена одним сервером за приемлемое время и может быть отнесена к задаче классу ‘больших данных’.

Предлагаемым в рамках доклада решением проблемы является организация облачной среды, вычислительные ресурсы и ресурсы системы хранения данных которой могут масштабироваться до тысяч виртуальных серверов и создание на ее базе распределенной вычислительной системы, которая осуществляет обработку снимков сетевого трафика за приемлемое время и обеспечивает близкий к линейному рост производительности при наращивании вычислительных мощностей.

Перспективным путем повышения эффективности использования вычислительных ресурсов и уменьшения времени решения задач обработки больших данных является совместное применение технологий облачных вычислений, гибридных вычислительных архитектур, и функциональных средств программирования. Использование функциональных средств разработки программного обеспечения обеспечивает внедрение таких технологий как реактивное программирование, акторное программирование и средствараспараллеливания программ с естественным параллелизмом для разработки приложений, обеспечивающих решение задач анализа сетевого трафика. Технологии облачных вычислений позволяют построить масштабируемую вычислительную среду с сервис-ориентированным интерфейсом доступа, что облегчит использование и обслуживание гибридной вычислительной системы. Архитектура системы, в которой вычислительные узлы являются так же узлами хранения данных, позволяет обеспечить очень важный принцип локальности обработки данных, что сокращает время доступа к распределенному хранилищу. В докладе рассматриваются методы и технологии распределенной обработки снимков сетевого трафика высоконагруженных сетей передачи данных для решения следующих задач обработки сетевого трафика:

1. Аналитика сетевых соединений и формирования статистики посещения информационных ресурсов, долю внутреннего и внешнего сетевого трафика (в пределах РФ и за пределы РФ).
2. Анализ полей прикладных протоколов извлечение и поиск информации в передаваемых данных.
3. Выявление нарушений политики доступа – доступ к запрещенным ресурсам, передача запрещенных данных, и т.д.
4. Поиск сигнатур компьютерных вирусов и запрещенных программ.

При обеспечении анализа снимков сетевого трафика за заданный промежуток времени, например, за 30 минут, появляется возможность оперативно реагировать на выявленные нарушения. В ходе анализа трафика могут быть сформировны управляющие воздействия в систему динамической генерации правил фильтрации для межсетевых экранов и устранения выявленных нарушений.

Концептуальная схема системы анализа снимков сетевого трафика «Летописец»представлена на рисунке 1:

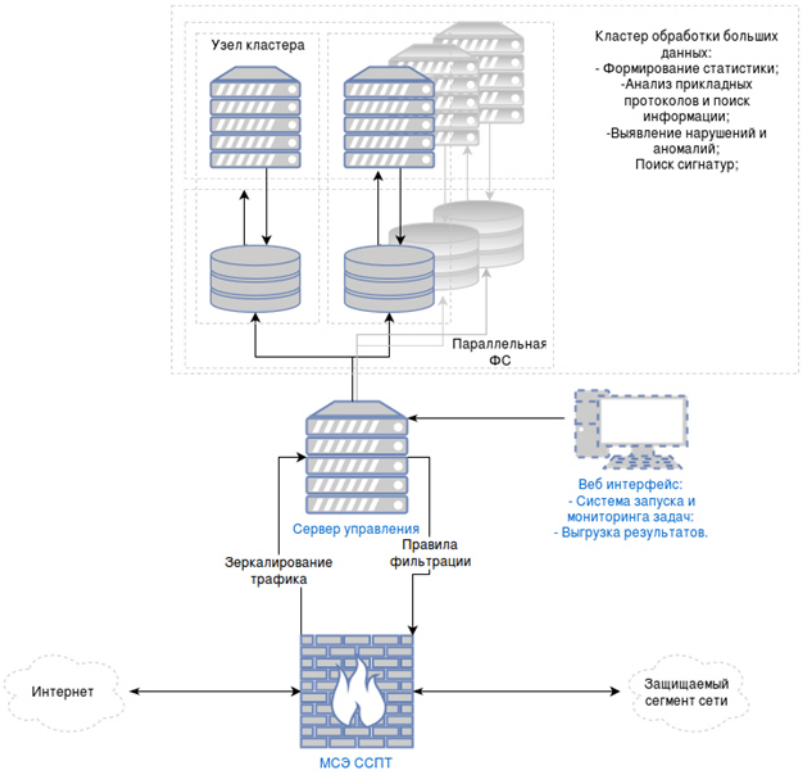


Рисунок 1 –Концептуальная схема системы анализа снимков сетевого трафика

Приблизительные технические характеристики разрабатываемой системы:

- Оперативная индексация снимка трафика, собранного в сети в течении 30 минут за 15-20 минут работы кластера (время обработки может быть уменьшено за счет масштабирования системы).
- Время поиска по проиндексированным данным за 5-30 минут в зависимости от типа поискового запроса.

- Оперативное хранилище сетевого трафика за последние 12 часов с емкостью от 150ТБ.
- Возможность подключения долговременного хранилища для сохраненных снимков сетевого трафика.

Преимущества разрабатываемого программного комплекса:

- Автоматическое масштабирование производительности и объема хранилища в зависимости от объема входных данных путем простого добавления вычислительных узлов в кластер.
- Возможность обработки как готовых дампов сетевого трафика в формате pCAP так и полученных путем включения устройства сбора данных в действующую вычислительную сеть без изменения топологии.
- Возможность динамической генерации правил фильтрации для МЭ на основании найденных нарушений политики доступа.
- Применение открытых программных разработок.
- Возможность установки на разные аппаратные платформы, что позволяет обеспечить использования сертифицированного оборудования без «закладок».
- Более низкая стоимость комплекса по сравнению с зарубежными аналогами, даже с учетом затрат на разработку ПО.

S.G. Kapustyan, L.Zh. Usachev, A.A. Dyachenko

THE WAY OF FORMATION TASK SOLVING FOR A GROUP OF UNMANNED

SFedU Acad. Kalyaev Scientific Research Institute of Multiprocessor Computer Systems, Taganrog
kap@mvs.sfedu.ru

Abstract

The way of formation task solving for a group of unmanned airplanes is suggested. The idea of suggested approach is that each unmanned airplane of the group is seeking to select such a point of target formation that its movement creates the minimum of troubles for movement of other airplanes when changing formation. The formation task is reduced to the assignment problem and then the task is being solved by means of Hungarian algorithm and the original algorithm of forming the matrix containing estimations of the assignments efficiency. As a result the suggested way allows to exclude an intersection and dangerous approaching of airplanes movement trajectories.

Keywords: formation task, group of unmanned airplanes, movement trajectory, safe movement, assignment problem, estimation of the assignment efficiency.

С.Г. Капустян, Л.Ж. Усачев, А.А. Дьяченко

СПОСОБ РЕШЕНИЯ СТРОЕВОЙ ЗАДАЧИ ДЛЯ ГРУППЫ БЛА САМОЛЕТНОГО ТИПА[*]

Научно-исследовательский институт многопроцессорных вычислительных систем имени академика А.В. Каляева федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет», г.Таганрог
kap@mvs.sfedu.ru

Аннотация

Предлагается способ решения строевой задачи в группе беспилотных летательных аппаратов самолетного типа. Идея предложенного подхода заключается в том, что каждый беспилотный летательный аппарат группы стремится выбрать такую точку целевой формации, что его перемещение создает минимум трудностей для перемещения других беспилотных летательных аппаратов при изменении формации. Строевая задача сводится к задаче о назначении и решается с использованием Венгерского алгоритма и оригинального алгоритма формирования матрицы оценок эффективности назначений. В результате предложенный способ позволяет избежать пересечения и опасного сближения траекторий движения беспилотных летательных аппаратов.

Ключевые слова: задача формирования строя, беспилотных летательных аппаратов самолетного типа, траектория движения, безопасное перемещение, задача о назначении, оценка эффективности назначения.

[*] Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проекты № 14-08-01176, № 6-29-04194

Одним из перспективных направлений развития беспилотной авиации является групповое применение беспилотных летательных аппаратов (БЛА). Во многих случаях применение группы БЛА существенно повышает эффективность выполнения военных и гражданских задач, таких как разведка, поиск объектов, аэрофотосъемка, мониторинг чрезвычайных ситуаций на больших территориях, мониторинг трубопроводов, линий электропередач и т.д. [1,2].

Следует отметить, что даже управление одиночным БЛА является сложной задачей и требует от человека-оператора достаточно высокой квалификации. Непосредственное же управление оператором группой БЛА практически невозможно и должно осуществляться системой управления в автоматическом режиме. За оператором при этом остаются функции контроля, постановка задачи группе и принятие решений в отдельных ситуациях.

При групповом управлении БЛА необходимо решать ряд достаточно сложных специфичных задач [2,3]. Одной из таких задач является формирование группой БЛА строя или формации (строевая задача). Под формацией будем понимать некоторую упорядоченную геометрическую конфигурацию группы БЛА в пространстве, предназначенную для скоординированного, слаженного полета группы БЛА и совместного выполнения группой различных заданий. При этом, при формировании строя или перестроении из одной (исходной) формации в другую (целевую) формацию, система должна осуществлять автоматический выбор цели движения каждым БЛА, обеспечивающий безаварийное перемещение всех БЛА группы в целевую формацию при минимизации временных затрат на изменение текущей формации. Примеры различных формаций показаны на рис. 1.

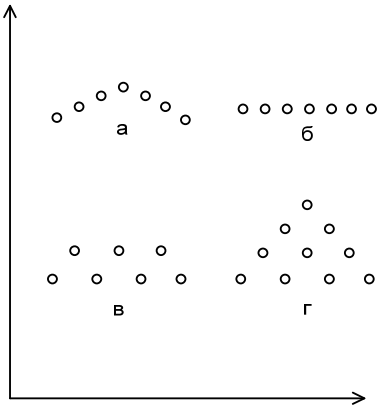


Рисунок 1 –Типы формаций: *а*–клин; *б*–линия; *в*–пила; *г*–пирамида

В настоящее время в ряде работ рассматриваются методы решения строевых задач для БЛА типа квадрокоптеров [4], однако, при использовании БЛА самолетного типа, для которых, в отличие от квадрокоптеров и подобных им аппаратов, такие маневры, как резкое изменение направления движения, поворот на месте или зависание невозможны, применение подобных подходов является проблематичным. Известны также некоторые подходы к решению строевых задач для БЛА самолетного типа. В частности, в работе [5] описан способ целераспределения, с использованием процедуры итерационного улучшения плана и матрицы дистанций между БЛА группы и точками целевой формации.

В настоящей работе рассматривается альтернативный подход, основанный на использовании матрицы оценки эффективности назначений БЛА группы на точки целевой формации, где элементы матрицы представляют собой оценку степени опасности, которую создает каждый БЛА для других БЛА группы при выборе им различных точек целевой формации.

С учетом сказанного, задача формирования строя группы БЛА самолетного типа, может быть сформулирована следующим образом.

Пусть имеется группа B из n БЛА ($i=\overline{0,n-1}$), каждый их которых b_i характеризуется вектором координат $\langle x_i, y_i, z_i \rangle$ в некоторой базовой системе координат $OXYZ$, связанной с землей, и направлением движения (курсом) φ_i.

Будем полагать, что все БЛА находятся в некоторой разумно ограниченной зоне, имеют общую скорость, а вектор направления скорости φ_i каждого БЛА лежит в пределах $\varphi_i \le \varphi^k \pm \Delta\varphi$, где φ^k – заданный угол курса целевой формации, а $\Delta\varphi$ – некоторое предельно допустимое отклонение.

Пусть $\langle x^k, y^k, z^k \rangle$ есть заданный некоторым образом вектор координат точки привязки целевой формации в базовой системе координат $OXYZ$, а относительные координаты $\langle x_j^s, y_j^s, z_j^s \rangle$ ($j = \overline{0, n-1}$) элементов (точек) q_j целевой формации Q задаются в некоторой декартовой системе координат $OX^sY^sZ^s$, центр которой в системе $OXYZ$ определяется вектором $\langle x^k, y^k, z^k \rangle$, а направление оси X^s совпадает с углом курса φ^k целевой формации, как это показано на рис. 2.

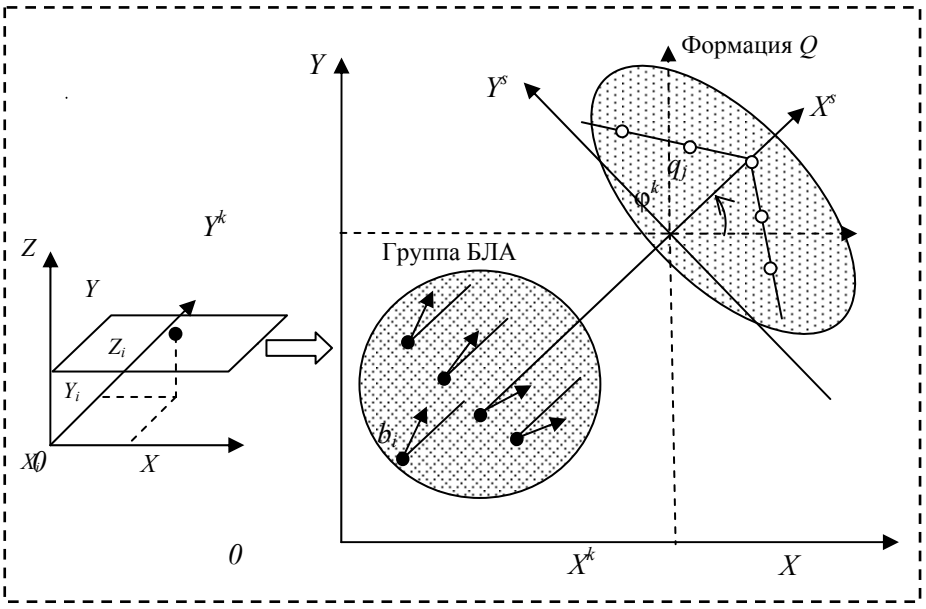


Рисунок 2 - Группа БЛА, целевая формация и системы координат

Тогда абсолютные координаты $\langle x_j^k, y_j^k, z_j^k \rangle$ ($j = \overline{0, n-1}$) элементов q_j целевой формации в базовой системе координат $OXYZ$ могут определяться следующим образом:

$$\begin{vmatrix} x_j^k \\ y_j^k \\ z_j^k \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} C & -S & 0 \\ S & C & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} St_x(x_j^s) \\ St_y(y_j^s) \\ St_z(z_j^s) \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} x^k \\ y^k \\ z^k \end{vmatrix},$$

где $C = \cos(\varphi^k)$, $S = \sin(\varphi^k)$, φ^k направлен против часовой стрелки;

St_x, St_y, St_z – некоторые операторы масштабирования (растяжения/сжатия).

Задача состоит в том, чтобы назначить каждому БЛА группы b_i ($i = \overline{0, n-1}$) такую цель движения из элементов q_j ($j = \overline{0, n-1}$) целевой формации, чтобы обеспечить безопасное перемещение всех БЛА группы к выбранным целям за некоторое заданное время. При этом в конечных точках траектории движения все БЛА группы должны иметь одинаковый курс φ^k. Термин «безопасное перемещение» в данном случае означает, что точки траекторий движения БЛА к целям, соответствующие одним и тем же моментам времени, должны находиться на безопасном расстоянии друг от друга. Для решения поставленной задачи предлагается подход, суть которого заключается в следующем.

Для каждого БЛА группы $b_i\,(i=\overline{0,n-1})$ с определенной дискретностью строится траектория движения к каждому элементу $q_j\,(j=\overline{0,n-1})$ целевой формации, обеспечивающая минимальное отклонение от прямой, соединяющей начальную и целевую точку, за некоторое заданное время ΔT. В результате будет сформирован двумерный массив траекторий $\{R_{ij}\}(i=\overline{0,n-1},\ j=\overline{0,n-1})$. При этом каждая траектория соответственно будет представлять собой массив векторов координат $\left\langle x_{ij}^t, y_{ij}^t, z_{ij}^t \right\rangle$($t=\overline{0,m-1}$), где m – количество точек дискретизации каждой траектории.

Пусть БЛА b_i выбрал некоторую целевую точку q_j. Тогда для траектории R_{ij} выполняется поэлементное сравнение с траекториями движения $R_{kl}\,(k=\overline{0,n-1},\ l=\overline{0,n-1},\ k\neq i, l\neq j)$ остальных БЛА группы к другим элементам целевой формации. Если точки траектории R_{ij} и R_{kl}, соответствующие одному и тому же моменту времени t, находятся в опасной близости, что можно определить условием $r < r_{\min}$, где $r_{\min}$ есть некоторое допустимое безопасное расстояние, то считается, что при выборе i-м БЛА j-й точки целевой формации будет создана помеха для достижения k-м БЛА l-й точки целевой формации. При этом r определяется соотношением

$$r=\sqrt{(x_{ij}^t-x_{kl}^t)^2+(y_{ij}^t-y_{kl}^t)^2+(z_{ij}^t-z_{kl}^t)^2}\ .$$

При выполнении данной процедуры для всех траекторий $R_{ij}(i=\overline{0,n-1}, j=\overline{0,n-1})$ мы получим некоторую матрицу D размерности $n\times n$ оценок эффективности выбора БЛА группы различных точек целевой формации. Каждая оценка $d_{ij}(i=\overline{0,n-1}, j=\overline{0,n-1})$ будет представлять собой суммарное количество опасных ситуаций (помех), которые БЛА b_i при выборе им цели q_j создает для других БЛА группы при выборе ими других точек целевой формации. Имея такую матрицу оценок эффективности, предлагается искать такое распределение элементов целевой формации $q_j\,(j=\overline{0,n-1})$ между БЛА $b_i\,(i=\overline{0,n-1})$, при котором суммарное количество помех для всех БЛА группы, определяемое по матрице D, будет минимальным. В свою очередь, данная задача сводится к задаче о назначениях n точек целевой формации на n БЛА по матрице оценок эффективности назначений, и может быть решена любым известным способом, например венгерским алгоритмом.

При описанном выше способе сравнения, траектории движения БЛА могут пересекаться в пространстве, но не пересекаться во времени. Для упрощения процедуры сравнения, предлагается проверять пересечение прямых, проходящих между точками исходной и целевой формации. То есть, если отрезки прямых, проходящих через точки i, j, принадлежащие соответственно исходной и целевой формации, и через другие точки k, l исходной и целевой формации, пересекаются, то соответствующий элемент матрицы эффективности выбора $d_{ij}(i=\overline{0,n-1}, j=\overline{0,n-1})$ увеличивается на единицу.Если предположить, что для достижения выбранной цели каждый БЛА будет совершать перемещения, обеспечивающие минимальное отклонение от прямой, соединяющей начальную и целевую точку (кратчайший путь к цели), то данный подход естественным образом обеспечивает минимизацию времени перестроения группы в целевую формацию. Пример формирования элементов матрицы оценок эффективности в данном случае приведен на рис. 3.

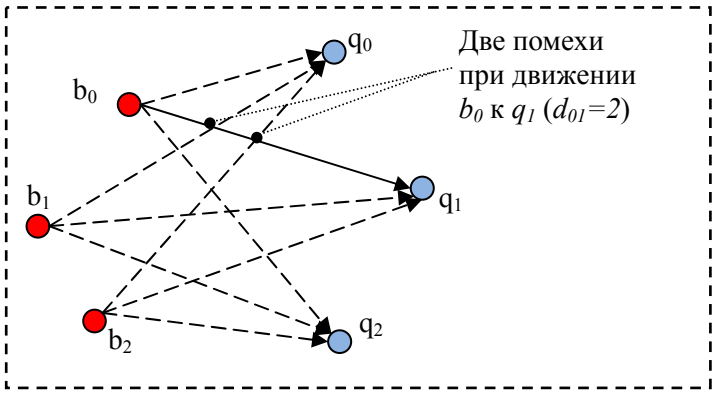


Рисунок 3 –Пример формирования элементов матрицы эффективности

Для экспериментальной проверки работоспособности предложенных алгоритмов была разработана программная модель, имитирующая процедуру целераспределения в группе БЛА при переходе из произвольной исходной формации в заданную целевую формацию. Программная модель реализована в среде разработки “MicrosoftVisualC++” и, кроме модулей непосредственно реализующих процедуру целераспределения, включает специальный редактор сценариев, позволяющий осуществлять размещение, удаление и перемещение объектов исходной и целевой формации на рабочем поле. Редактор позволяет также растягивать (сжимать) формации по координатам *X*, *Y*, а также поворачивать их на заданный угол относительно геометрического центра формации. Предусмотрена возможность сохранения созданных сценариев в специальных файлах и загрузка готовых сценариев. Экранная форма программной модели при перестроении группы из произвольно расположенных семи БЛА в целевую формацию «клин» показана на рис. 4. Результаты целераспределения отображаются линиями синего цвета, соединяющими объекты исходной формации с выбранными точками целевой формации, а условные траектории движения БЛА отображаются красным.

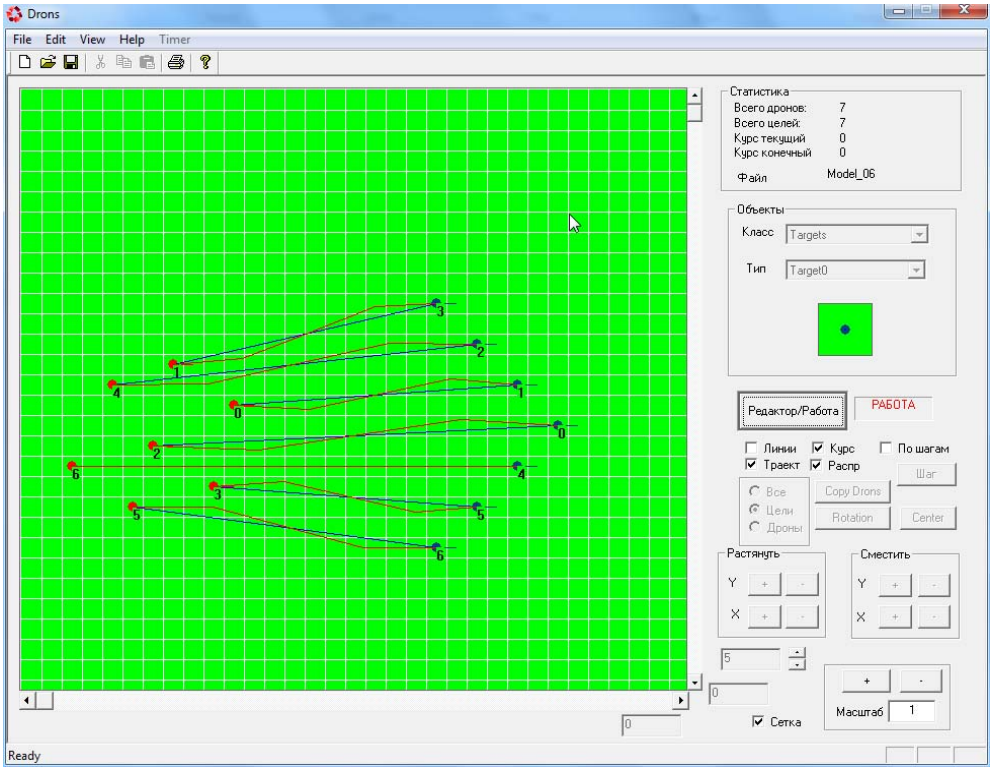


Рисунок 4 - Результаты работы программной модели при перестроении группы из произвольно расположенных семи БЛА в целевую формацию «клин»

Результаты моделирования подтверждают работоспособность предложенного подхода и показывают, что удается получить близкий к оптимальному вариант распределения группы БЛА по элементам целевой формации с точки зрения обеспечения безопасности перемещения БЛА группы и минимизации временных затрат при перестроении.

При использовании предложенного подхода, управление процессом изменения формации группы БЛА может быть организовано следующим образом. Текущее положение группы БЛА непрерывно отображается на экране монитора системы управления. На верхнем уровне, при необходимости изменения текущей формации, оператор с помощью соответствующих элементов управления задает требуемую целевую формацию и указывает на экране точку привязки относительно исходной формации. При этом заведомо недоступные координаты точки привязки могут автоматически блокироваться с выдачей оператору соответствующего сообщения. Далее, в автоматическом режиме производится моделирование распределения БЛА по точкам целевой формации, которое обеспечивает минимизацию вероятности пересечения (опасного сближения) траекторий БЛА при выполнении перестроения. По окончании моделирования исходная формация, целевая формация и траектории движения БЛА к точкам целевой формации отображаются на экране монитора. Если оператор удовлетворен полученным результатом целераспределения, он выдает команду на выполнение перестроения, каждый БЛА группы получает соответствующие целевые координаты, и группа начинает выполнение маневра. При этом для достижения БЛА целевых точек можно использовать известные алгоритмы группового управления нижнего уровня [3]. Если же оператор сочтет полученное целераспределение небезопасным, он может изменить геометрию целевой формации, или же перенести точку привязки целевой формации, после чего производится повторное целераспределение.

1. Управление и наведение беспилотных маневренных летательных аппаратов на основе современных информационных технологий / Под ред. М.Н. Красильщиков, Г.Г. Себряков. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 280 с.
2. Самодов И.О., Дмитриев Д.Д. Синтез алгоритма управления группой беспилотных летательных аппаратов с лидером // Аэрокосмический научный журнал. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2015. № 04. – С. 15-24.
3. Меркулов В.И., Миляков Д.А., Самодов И.О. Оптимизация алгоритма группового
4. управления беспилотными летательными аппаратами в составе локальной сети // Известия ЮФУ. Технические науки. №12 (161). 2014. С.157-166.
5. Иванов Д.Я. Решение строевой задачи в группе беспилотных квадрокоптеров // Известия ЮФУ. Технические науки. 2014. №8. – С. 138-147.
6. Дьяченко А.А. Задача формирования строя в группе БЛА // Известия ЮФУ. Техническиенауки. 2012. №3. – С. 22-30.

A.V. Ananiev, G.A. Kaschenko

A CHOICE OF RATIONAL VERSION OF AN AEROPORTABLE NETWORK ON THE BASIS OF UNMANNED AERIAL VEHICLES FOR SUPPORT OF CONNECTION OF TACTICAL SUBDIVIDINGS

MECS AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy», Voronezh
sasha303_75@mail.ru

А.В. Ананьев, Г.А. Кащенко

ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНОГО ВАРИАНТА АЭРОМОБИЛЬНОЙ СЕТИ НА БАЗЕ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СВЯЗИ ТАКТИЧЕСКИХ ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ

ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж
sasha303_75@mail.ru.

Аннотация

Рассмотрена методика, позволяющая сформировать множество допустимых альтернативных вариантов аэромобильной сети связи (АСС) тактических подразделений, получить оптимальные по Парето альтернативы и выбрать наилучший вариант с использованием обобщенного критерия.

Ключевые слова: аэромобильные сети связи, векторный критерий, Парето-оптимальные варианты, обобщенный критерий, тактическое подразделение, территориальный район.

Известна проблема организации сетей связи в трудно доступных территориальных районах (горной или болотистой местности) для тактических подразделений, занимающая продолжительный период времени и требующая больших материальных затрат. Эта проблема может быть решена путем

организации АСС на базе БЛА, для которых в работах [1-3] рассмотрены вопросы маршрутизации, оценки рисков и повышения живучести. Важное место при создании АСС по своему влиянию на результаты проектирования занимают задачи, направленные на поиск оптимальных проектных решений и допускающих в известной мере формализованное представление множества вариантов проекта и правил их сравнительной оценки по совокупности частных критериев, учитывающих, в том числе, рациональное использование материальных ресурсов. Разнообразие существующих и появление новых технологий, которые могут быть положены в основу построения АСС требует оценки их эффективности для обоснованного выбора того или иного варианта сети. Таким образом, существует необходимость разработки методики выбора наилучшего варианта АСС для использования в конкретной задаче, позволяющей исключить эмпирические рассуждения, без учета объективных критериев.

Целью работы является разработка методики, обеспечивающей формирование множества допустимых альтернативных вариантов аэромобильной сети связи тактических подразделений, получение оптимальных по Парето альтернатив и выбор среди них наилучшего варианта с использованием обобщенного критерия.

В статье предлагается методика, позволяющая сформировать множество альтернативных вариантов построения АСС, получить оптимальные по Парето альтернативы в результате сравнения вариантов по векторным критериям и выбрать компромиссно-оптимальный вариант ее построения, например, по критерию «эффективность/затраты». Реализация методики оценки и выбора рационального варианта АСС включает следующие этапы: формирование вектора частных критериев качества; нормализация (приведение к единой мере) частных критериев, выделение множества компромиссов (эффективных по Парето решений), выбор схемы компромиссов и единственного решения и др.

При большом числе критериев в задаче многокритериального выбора (МКВ) их структурируют в виде иерархии. В большинстве практических задач МКВ варианта АСС число критериев больше десяти, и они должны рассматриваться как задачи МКВ с иерархической системой критериев. С этой целью выбранные критерии целесообразно вначале иерархически структурировать, что позволяет, во - первых, сравнивать сети по отдельным групповым признакам, во - вторых, облегчается процедура определения коэффициентов весомости критериев. Группировка критериев оценки эффективности АСС по каким - либо признакам способствует получению более достоверных результатов интегральной оценки сети. В общем случае все множество критериев оценки эффективности включает несколько десятков критериев, которые целесообразно сгруппировать, например, по видовым группам: общие, функциональные, топологические, экономические и специальные. Рассмотренные группы критериев нельзя считать «жестко» заданными. В зависимости от особенностей конкретной задачи выбора варианта эти группы могут расширяться, либо, наоборот, из их состава могут быть выбраны наиболее влияющие на выбор варианта сети критерии.

На основе анализа работ [4, 5] можно сделать вывод, что нормализацию сформированного векторного критерия наиболее целесообразно выполнить с применением вектора ограничений

$$\vec{q}_н = \vec{q}_н(x) = \{q_i(x)/q_{max}\}_{i=1}^{M} = \{q_{нi}(x)\}_{i=1}^{M}$$

где q_{max} – компонента нормирующего вектора ограничений. Согласно известной теоремы [4, 6], эта операция является монотонной и решение, полученное в нормализованном пространстве критериев, не изменяется при переходе к исходному пространству частных критериев.

Согласно работе [4] множество Парето - выделяется из нормализованного пространства критериев в результате решения задачи параметрического программирования

$$x^* = \arg\min_{x \in X} \sum_{i=1}^{M} \alpha_i q_{нi}(x), \quad (1)$$

где $q_{нi}(x)$ – нормализованное значение i - го частного критерия; $\alpha_i, i = 1,2,\dots M$ – вектор коэффициентов «важности» частных критериев, удовлетворяющих условию

$$\sum_{i=1}^{M} \alpha_i = 1, \alpha_i \geq 0, \quad (2)$$

Анализ работ [4, 6] показывает, что для построения функции обобщенного критерия, чаще всего применяется линейная свертка частных критериев.

Наиболее простой обобщенной функцией векторного критерия является

$$Q(\alpha,q)=\sum_{i=1}^{M}\alpha_i q_{ni}(x);\sum_{i=1}^{M}\alpha_i=1,\alpha_i\geq 0,i=1,2,\dots M,$$

где $\alpha_i, i=1,2,\dots M$ – коэффициенты, отображающие приоритеты лица, принимающего решения (ЛПР), которое принимает решение о важности отдельных частных критериев. Следовательно $Q(\alpha,q)$ является обобщенным критерием и имеет смысл скалярной свертки вектора частных критериев.

Рассмотрим методику многокритериальной оптимизации основных параметров АСС, а также методику выбора наилучшего варианта сети, которые возникают на начальных этапах разработки и создания рассматриваемой сети. Методика позволяет создать и оценить статистические свойства многофакторных регрессионных моделей критериальных функций для построения множества альтернативных вариантов сети, провести существенное сокращение количества альтернатив оптимальных по Парето решений в результате сравнения вариантов по векторным критериям; выбрать единственное компромиссно - оптимальное решение по выбранной схеме компромиссов при различных сочетаниях коэффициентов важности частных критериев.

Рассмотрим задачу векторной оптимизации параметров АСС территориального района.

На начальном этапе построения концепции сети исходные данные задаются набором параметров $x=\{x\}_{i=1}^{n}, x\in X$. Предполагается, что функционирование сети зависит только от этих параметров.

Для каждого параметра задаются ограничения в виде неравенств

$$x_{Hi}\leq x_j\leq x_{Bi}, j=1,2,\dots,p \tag{3}$$

Система неравенств (3) образует допустимую область Q_D

$$\Delta_j=[x_{Hi},x_{Bi}], j=1,2,\dots,p, Q_D=I\Delta_j.$$

Качество принятого решения оценивается по совокупности противоречивых частных критериев

$$\vec{q}=\vec{q}(x)=\{q_i(x)\}_{i=1}^{M}. \tag{4}$$

Критерии $q_i(x),\ i=1,2,\dots,M$ должны быть положительными и требуют либо минимизации, либо максимизации. В число частных критериев могут входить, например, следующие: устойчивость, готовность, мобильность, пропускная способность, доступность, управляемость, защищенность и др.

Постановка задачи состоит в том, чтобы сформировать множество альтернативных вариантов построения АСС, которая принадлежит Q_D, в результате сравнения вариантов по векторным критериям (4) получить эффективные по Парето альтернативы и выбрать на основе информации об относительной важности частных критериев с использованием обобщенного критерия единственный компромиссно-оптимальный вариант сети.

В случаях, когда аналитические зависимости критериев от параметров неизвестны на первом этапе решения задачи необходимо построить регрессионные модели частных критериев от параметров путем проведения экспериментальных процедур. Как аппроксимирующие многочлены может быть использована квадратичная полиномиальная форма регрессионных моделей. Неизвестные коэффициенты полинома находятся с помощью метода наименьших квадратов. Для полученных регрессионных моделей проводится комплексная оценка статистических характеристик по результатам регрессионного анализа. Затем принимается решение о возможности применения моделей для создания множества альтернативных вариантов АСС.

На втором этапе рассчитывается множество альтернативных вариантов сети (пробных точек в пространстве параметров). В этом множестве вариантов сети оптимальным по Парето вариантам построения сети соответствует множество эффективных точек, описываемых формулой

$$X^k=\{x'/x'\in X;\forall x\in X: q_k(x')\leq q_k(x), k=1,2,\dots,M\},$$

причем хотя бы одно из неравенств является строгим. Эти решения удовлетворяют векторному критерию (2) при заданных ограничениях (1). Точки области определяются по результатам решения задачи параметрического программирования типа (1) - (2). Получение оптимальных точек Парето выполняется в нормализованном пространстве критериев. Координаты точек этого пространства вычисляют по формуле

$$q_{нki}(x)=(q_{ктеki}(x)-q_{imin}(x))/(q_{imax}(x)-q_{imin}(x)), \tag{5}$$

где $q_{imin}(x)$, $q_{imax}(x)$ – минимальное и максимальное значение *к*-го критерия, рассчитанные по моделям; $q_{нki}(x), q_{ктеki}(x)$ – нормализованное и текущее значение частного критерия в *i*-й точке.

Множество Парето-оптимальных вариантов АСС получают в результате сравнения альтернатив с использованием векторного критерия (2). Варианты, которые остались после удаления худших решений, являются компромиссно - оптимальными и образуют множество компромиссов Q_D (Парето-оптимальных решений).

Алгоритм выделения Парето-оптимальных точек включает следующие шаги:

Шаг 1. Ввод исходных данных: ограничений на параметры в виде нижней x_{Hj} и верхней x_{Bj} границ; количества пробных вариантов построения сети; значений формального векторного параметра a∈[0,1].

Шаг 2. Формирование множества нормированных $ЛП_\tau$ точек в единичном гиперкубе.

Шаг 3. Расчет множества точек пространства параметров Q_D с использованием нормированных значений $ЛП_\tau$ точек и ограничений на параметры.

Шаг 4. Расчет частных критериев с использованием моделей и получение множества точек в пространстве критериев в натуральных значениях.

Шаг 5. Нормализация (приведение значений частных критериев к безразмерной шкале в диапазоне [0,1]) пространства критериев в предположении, что значение частных критериев строго положительные $q_i(x) \geq 0$.

Шаг 6. Формирование множества Парето - оптимальных вариантов сети и построение компромиссной кривой.

Шаг 7. Определение совокупности значений координат точек ненормированного пространства критериев и координат точек пространства параметров, соответствующие каждой точке множества Парето.

Совокупность найденных таким образом точек пространства параметров образует Парето - оптимальные варианты сети, по которым строится кривая Парето.

Рассмотрим пример. Пусть АСС оцениваются следующими пятью частными критериями:

$q_{1i} = (N_i - N_{\min}) / (N_{\max} - N_{\min})$; $q_{2i} = 1 - (\Delta t_i - \Delta t_{\min}) / (\Delta t_{\max} - \Delta t_{\min})$;

$q_{3i} = (C_{БОi} - C_{БОmin}) / (C_{БОmax} - C_{БОmin})$; $q_{4i} = (C_{Пi} - C_{Пmin}) / (C_{Пmax} - C_{Пmin})$;

$q_{5i} = (C_{ДОi} - C_{ДОmin}) / (C_{ДОmax} - C_{ДОmin})$; N_i – возможное число одновременно обратившихся к системе абонентов; N_{min}, N_{max} – соответственно минимальные и максимальные значения количества абонентов для рассматриваемых вариантов; Δt_i – интервал времени обслуживания абонента; Δt_{min}, Δt_{max} – соответственно минимальные и максимальные значения интервалов времени для рассматриваемых вариантов. ; $C_{БОi}$ – стоимость i-го варианта базового беспроводного оборудования (точки доступа, модемы); $C_{Пi}$ – стоимость подключения i-го варианта к сегменту системы, включая стоимость монтажных работ, беспроводных сетей и, при необходимости, дополнительного беспроводного коммутационного оборудования; $C_{ДОi}$ – стоимость i-го варианта дополнительного оборудования, необходимого для обеспечения уверенного беспроводного соединения с учетом удаленности или особого размещения пользователей (направленные антенны, дополнительные точки доступа в режиме повторителей); $C_{БОmin}, C_{БОmax}, C_{Пmin}, C_{Пmax}, C_{ДОmin}, C_{ДОmax}$ – соответственно минимальные и максимальные значения стоимостей для рассматриваемых вариантов.

В рассматриваемом случае задача выбора наилучшего варианта сети сводится к следующей задачи векторной оптимизации:

$$Q(q) = \{q_1(x), q_2(x), q_3(x), q_4(x), q_5(x)\} \to \max_{x \in П \subset D}$$

Единственный компромиссно-оптимальный вариант построения сети, удовлетворяющий векторному критерию (2), выполняется на основе информации об относительной важности частных критериев с использованием целевой функции

$$Q(q) = \sum_{i=1}^{M} \alpha_i q_{нi}(x); \sum_{i=1}^{M} \alpha_i = 1, \alpha_i \geq 0, i = 1,2,\ldots M,$$

где $Q(q)$ – обобщенный критерий; $q_{ni}(x)$ – нормализованное значение i - го частного критерия; $\alpha_k, k = 1,2,\ldots,M$ – коэффициенты важности частных критериев.

Единственное решение многокритериальной задачи определяется путем минимизации функции обобщенного критерия

$$x^* = \arg\min_{x \in X} Q[q(x)] \quad (6)$$

Для выбора единственного компромиссно - оптимального варианта сети с использованием обобщенного критерия $Q(q)$ используется следующий алгоритм:

Шаг 1. Ввод исходных данных: диапазонов изменения значений параметров в виде нижней x_{Hj} и верхней x_{Bj} границы; количества альтернативных вариантов сети и весовых коэффициентов важности частных критериев.

Шаги 2 - 5. Аналогичны шагам 2 - 5 предыдущего алгоритма.

Шаг 6. Формирование обобщенного критерия $Q(q)$.

Шаг 7. Расчет нормированных значений во всех точках пространства критериев при различных значениях коэффициентов важности частных критериев $Q(q)$.

Шаг 8. Определение точки минимума обобщенного критерия $Q(q)$ при различных коэффициентах важности частных критериев.

Шаг 9. Определение значений основных параметров сети и критериев, соответствующих точкам минимума обобщенного критерия $Q(q)$.

Шаг 10. Анализ полученных компромиссно - оптимальных вариантов сети и выбор окончательного решения.

Рассмотрим пример оценки и выбора рационального варианта АСС для заданного территориального района. Характерной особенностью трудно доступных территориальных районов является малая плотность абонентов и относительно низкая обеспеченность ресурсами. В общем случае базовым критерием оценки Q возможных решений может служить один из вариантов распространенного критерия «эффективность-стоимость»

$$Q(E,C) \to extr, \quad (7)$$

где E – обобщенная оценка эффективности варианта АСС; C – затраты на его реализацию.

Среди характеристик, наиболее влияющих на эффективность E функционирования сети в трудно доступном территориальном районе целесообразно выделить три основные группы: информационную, пользовательскую и топологическую. При этом каждый показатель имеет различную важность при оценке эффективности функционирования сети. В таком случае на практике чаще всего строится оценочная функция, которая ставит в соответствие каждому показателю некоторую количественную характеристику, определяющую важность альтернативы в рейтинговом списке. В качестве интегральной оценки целесообразно использовать аддитивную свертку критериев, при расчете которой необходимо назначить веса частных критериев и, при необходимости, учесть взаимное влияние критериев.

Под эффективностью E сети следует понимать ее способность удовлетворить требования абонентов системы с точки зрения возможности передачи/приема необходимых объемов информации при заданном ограничении на время ее передачи/приема.

$$E_{ni} = \alpha_1 \cdot q_{1i} + \alpha_2 \cdot q_{2i}, \quad (8)$$

где E_{ni} – нормированное значение эффективности для i-го варианта; α_1, α_2 – коэффициенты важности составляющих эффективности, определяемые экспертным путем ($\alpha_1 + \alpha_2 = 1$);

Стоимость C_i конкретной i - ой структуры сети, на которую в первую очередь окажет влияние топологическая группа, в наиболее общем случае может быть оценена тремя составляющими:

$$C_i = C_{БОi} + C_{ТПi} + C_{ДОi}, \quad (9)$$

Учет в обобщенном критерии различных по физической природе величин приводит к целесообразности формировать критерий в нормированном виде, в том числе и составляющую стоимости. Таким образом, выражение (3) может быть записано в виде

$$C_{нi} = \alpha_3 \cdot q_{3i} + \alpha_4 \cdot q_{4i} + \alpha_5 \cdot \mathrm{q}_{5\mathrm{i}}, \quad (10)$$

где C_{Hi} – нормированное значение стоимости для i-го варианта; $\alpha_3, \alpha_4, \alpha_5$ – коэффициенты важности стоимостных составляющих, определяемые экспертным ($\alpha_3 + \alpha_4 + \alpha_5 = 1$);

Такой подход предопределяет выбор вида обобщенного критерия, так как теоретически значение С для одного из вариантов может быть равно нулю, что исключает применение относительного критерия и делает целесообразным формирование обобщенного критерия в виде нахождения максимального значения суммы нормированных значений эффективности и стоимости

$$\mathrm{Q_i} = w_1 \cdot E_{нi} + w_2 \cdot (1 - C_{нi}) \to \max, \quad (11)$$

где w_1 и w_2 – коэффициенты важности отдельных составляющих обобщенного критерия Q, определяемые экспертным путем ($w_1 + w_2 = 1$); $\mathrm{E_{Hi}}, C_{Hi}$ – нормированные значения величин эффективности и стоимости.

Таким образом, с помощью рассмотренного подхода можно:

- обосновать выбор системы критериев для оценки вариантов сети и сформировать множество альтернативных вариантов ее построения;
- ыделить среди множества альтернативных вариантов сети оптимальные по Парето варианты путем сравнения альтернатив по векторным критериям;
- существить выбор единого предпочтительного компромиссно-оптимального варианта сети на основе субъективной информации об относительной важности частных критериев с использованием скалярного обобщенного критерия.

1. Ананьев А.В., Змий Б.Ф, Кащенко Г.А. Оценка риска влияния физических и информационных разрушающих воздействий на аэромобильную сеть связи. Мат. докл. I Всероссийской НПК «Авионика.». – Воронеж. – ВУНЦ ВВС «ВВА», 2016 г. С. 22-26.
2. Ананьев А.В., Кащенко Г.А. Живучесть аэромобильных сетей связи на базе беспилотных летательных аппаратов. Мат. докл. I Всероссийской НПК «Авионика». – Воронеж. – ВУНЦ ВВС «ВВА», 2016 г. С. 16-21.
3. 3. Ананьев А. В., Афанасьев А. Л., Змий Б. Ф., Кащенко Г. А. Многокритериальный выбор маршрута в системах связи на базе беспилотных летательных аппаратов . Мат. докл. III Всероссийской НПК «Авиатор» в 2-х томах. Т. – 2 Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2016. – С. 15-20.
4. Подиновский В.В. , Ногин В.Д. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач. - М.: Наука , 1982 . - 256 с.
5. Соболь И.М. , Статников Р.Б. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. - М.: Наука , 1981 . - 110 с.
6. Гермейера Ю.Б. Введение в теорию исследования операций . - М.: Наука , 1971 . - 383 с.
7. Лапач С.Н. , Чубенко А.В. , Бабич П.Н. Статистика в науке и бизнесе. - М.: ООО « МОРИОН », 2002. - 640 с.

P.P. Byelonozhko

QUALITATIVE ANALYSIS OF PLANE INERTIAL MOTIONS OF ONE-DEGREE SPACE MANIPULATOR ON MOVABLE PLATFORM

Bauman Moscow State Technical University
byelonozhko@mail.ru

Abstract

Analysis of inertial motions analogous to natural mode shape of mechanical system is performed for free in inertial space plane one-degree double-link mechanism. Examined problem is of model character and permits to reveal qualitative movement picture, analyze an influence of manipulator characteristic and initial conditions on its dynamics. Results are of interest in the view of construction optimal in a certain sense active control actions for promising class of assembly and service self-contained robotic space modules.

Keywords: manipulator dynamics modeling, movable platform, model task, independent equation of relative motion dynamics.

П.П. Белоножко

КАЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ ПЛОСКИХ ИНЕРЦИОННЫХ ДВИЖЕНИЙ ОДНОСТЕПЕННОГО КОСМИЧЕСКОГО МАНИПУЛЯТОРА НА ПОДВИЖНОМ ОСНОВАНИИ

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва
byelonozhko@mail.ru

Аннотация

Для свободного в инерциальном пространстве плоского одностепенного двухзвенного механизма выполнен анализ инерционных движений, аналогичных собственным формам колебаний механической системы. Рассмотренная задача носит модельный характер и позволяет выявить качественную картину движения, проанализировать влияние параметров манипулятора и начальных условий на его динамическое поведение. Результаты представляют интерес с точки зрений построения оптимальных в некотором смысле активных управляющих воздействий для перспективного класса монтажно-сервисных автономных роботизированных космических модулей.

Ключевые слова: моделирование динамики манипулятора, подвижное основание, модельная задача, независимое уравнение динамики относительного движения.

Введение

В [1] по результатам анализа тенденций развития космической робототехники выделен перспективный класс монтажно-сервисных автономных роботизированных космических модулей, важной особенностью которых является многообразие возможных режимов функционирования.

Выделены 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.

В рамках процедуры орбитального монтажа проанализированы потенциально возможные режимы функционирования такого модуля, предполагающие различные варианты сочетания управляемого перемещения подвижного основания в инерциальном пространстве с управляемым перемещением груза относительно основания при помощи манипулятора.

Как отмечается в [2], вопросы динамики транспортирующих движений многозвенных кинематических цепей весьма сложны для качественного аналитического исследования. Тем большую ценность представляют задачи, в которых динамические режимы движения манипуляторов допускают аналитические изучение. Такие задачи носят модельный характер, и позволяют выявить качественную картину движения, проанализировать влияние параметров манипулятора на его динамическое поведение и на свойства траекторий движения схвата.

Особо выделена целесообразность изучения некоторых чисто инерционных движений манипуляционного механизма, аналогичных собственным формам колебаний механической системы, с точки зрений построения оптимальных в некотором смысле активных управляющих воздействий. В качестве примера приводится коллинеарное управление, при котором геометрический характер движения оказывается идентичным характеру свободных движений по инерции. Отмечается также существенная роль динамических эффектов при разгоне-торможении, целесообразность рассмотрения импульсных (ударных) режимов управляемого движения, возможность оптимизации движений путем подбора параметров и начальных условий.

В качестве примера реализации предлагаемого подхода в [2] рассмотрена задача о движении по инерции плоского шарнирного двухзвенника на неподвижном основании. В настоящей работе выполнено аналогичное исследование движений по инерции свободного в инерциальном пространстве плоского двухзвенника.

Модельная задача

Рассмотрим [4 – 6] плоское движение системы двух твердых тел 1 и 2, связанных идеальным одностепенным вращательным шарниром. Массы тел соответственно m_1 и m_2, J_1 и J_2 – моменты инерции тел относительно их центров масс, l_1 и l_2 – расстояния от центров масс тел до шарнира.

Предположим отсутствие действия на систему внешних сил и моментов. Тогда не вращающаяся система координат XOY с началом в центре масс системы будет инерциальной. Положение системы

по отношению к XOY определим углом φ_1 между осью абсцисс и линией, проходящей через центр масс первого тела и вращательный шарнир, отсчитываемым против часовой стрелки, и шарнирным углом q между линией, проходящей через шарнир и центр масс второго тела, и линией, проходящей через центр масс первого тела и шарнир, также отсчитываемым против часовой стрелки. Нулевым значениям координат φ_1 и q соответствует положение системы, при котором центры масс тел и шарнир расположены на оси абсцисс, при этом меньшую абсциссу имеет центр масс первого тела, большую абсциссу – центр масс второго тела, шарнир расположен между центрами масс тел.

По определению центра масс системы тел координаты центра масс первого тела связаны с координатами φ_1 и q соотношениями

$$x_1 = -\frac{m_2}{m_1 + m_2}\left(l_1 \cos\varphi_1 + l_2 \cos\left(\varphi_1 + q\right)\right), \tag{1}$$

$$y_1 = -\frac{m_2}{m_1 + m_2}\left(l_1 \sin\varphi_1 + l_2 \sin\left(\varphi_1 + q\right)\right). \tag{2}$$

Таким образом, при заданных φ_1 и q однозначно определено положение основания (тела 1) в инерциальной системе координат XOY (обобщенные координаты x_1, y_1 и φ_1) и положение груза (тела 2) относительно основания (обобщенная координата q).

Получение и исследование независимого уравнения динамики относительного движения

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

$$T = \frac{1}{2}\dot{\varphi}_1^{\,2}\left(J_1 + J_2 + \tilde{m}l_1^{\,2} + \tilde{m}l_2^{\,2} + 2\tilde{m}l_1 l_2 \cos q\right) + \dot{\varphi}_1\dot{q}\left(J_2 + \tilde{m}l_2^{\,2} + \tilde{m}l_1 l_2 \cos q\right) + \frac{1}{2}\dot{q}^2\left(J_2 + \tilde{m}l_2^{\,2}\right), \tag{3}$$

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

С учетом ранее сделанного предположения об отсутствии внешних сил и моментов, из (3) следует, что координата q является позиционной, а координата φ_1 – циклической. Имеет место циклический интеграл

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_1} = \dot{\varphi}_1\left(J_1 + J_2 + \tilde{m}l_1^{\,2} + \tilde{m}l_2^{\,2} + 2\tilde{m}l_1 l_2 \cos q\right) + \dot{q}\left(J_2 + \tilde{m}l_2^{\,2} + \tilde{m}l_1 l_2 \cos q\right) = L = const\ , \tag{4}$$

отражающий факт постоянства кинетического момента системы L в отсутствие внешних моментов.

Из (4) может быть выражена циклическая скорость $\dot{\varphi}_1$

$$\dot{\varphi}_1 = \dot{\varphi}_1(\dot{q}, q, L) = -\dot{q}\frac{\left(J_2 + \tilde{m}l_2^{\,2} + \tilde{m}l_1 l_2 \cos q\right)}{\left(J_1 + J_2 + \tilde{m}l_1^{\,2} + \tilde{m}l_2^{\,2} + 2\tilde{m}l_1 l_2 \cos q\right)} + L\frac{1}{\left(J_1 + J_2 + \tilde{m}l_1^{\,2} + \tilde{m}l_2^{\,2} + 2\tilde{m}l_1 l_2 \cos q\right)}. \tag{5}$$

Подставив (5) в (1), получим выражение для кинетической энергии системы как функции позиционной скорости $\dot{q}$, позиционной координаты q и кинетического момента L

$$\begin{aligned} T^*(\dot{q}, q, L) &= \left[T(\dot{\varphi}_1, \dot{q}, q)\right]_{\dot{\varphi}_1 = \dot{\varphi}_1(\dot{q}, q, L)} = \\ &= \frac{1}{2}\dot{q}^2\frac{\left(J_1 + \tilde{m}l_1^{\,2}\right)\left(J_2 + \tilde{m}l_2^{\,2}\right) - \tilde{m}^2 l_1^{\,2} l_2^{\,2}\cos^2 q}{\left(J_1 + J_2 + \tilde{m}l_1^{\,2} + \tilde{m}l_2^{\,2} + 2\tilde{m}l_1 l_2 \cos q\right)} + L^2\frac{1}{\left(J_1 + J_2 + \tilde{m}l_1^{\,2} + \tilde{m}l_2^{\,2} + 2\tilde{m}l_1 l_2 \cos q\right)} \end{aligned}. \tag{6}$$

Запишем выражение для функции Рауса [3]

$$\begin{aligned} R = R(\dot{q}, q, L) = T^*(\dot{q}, q, L) - \dot{\varphi}_1(\dot{q}, q, L)\cdot L = \frac{1}{2}\dot{q}^2\frac{\left(J_1 + \tilde{m}l_1^{\,2}\right)\left(J_2 + \tilde{m}l_2^{\,2}\right) - \tilde{m}^2 l_1^{\,2} l_2^{\,2}\cos^2 q}{\left(J_1 + J_2 + \tilde{m}l_1^{\,2} + \tilde{m}l_2^{\,2} + 2\tilde{m}l_1 l_2 \cos q\right)} + \\ + \dot{q}L\frac{\left(J_2 + \tilde{m}l_2^{\,2} + \tilde{m}l_1 l_2 \cos q\right)}{\left(J_1 + J_2 + \tilde{m}l_1^{\,2} + \tilde{m}l_2^{\,2} + 2\tilde{m}l_1 l_2 \cos q\right)} - \frac{1}{2}L^2\frac{1}{\left(J_1 + J_2 + \tilde{m}l_1^{\,2} + \tilde{m}l_2^{\,2} + 2\tilde{m}l_1 l_2 \cos q\right)} \end{aligned}. \tag{7}$$

Тогда для позиционной координаты может быть записано уравнение Рауса, имеющее форму уравнения Лагранжа 2 рода, в котором роль кинетической энергии играет функция Рауса (7)

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial R}{\partial \dot{q}}\right)-\frac{\partial R}{\partial q}=M\,, \tag{8}$$

где M – управляющий момент в шарнире.

Подставив (7) в (8), получим

$$\ddot{q}\frac{\left(J_1+\tilde{m}l_1^{\,2}\right)\left(J_2+\tilde{m}l_2^{\,2}\right)-\tilde{m}^2l_1^{\,2}l_2^{\,2}\cos^2 q}{\left(J_1+J_2+\tilde{m}l_1^{\,2}+\tilde{m}l_2^{\,2}+2\tilde{m}l_1l_2\cos q\right)}+\dot{q}^2\frac{\tilde{m}l_1l_2\sin q\left(J_1+\tilde{m}l_1^{\,2}+\tilde{m}l_1l_2\cos q\right)\left(J_2+\tilde{m}l_2^{\,2}+\tilde{m}l_1l_2\cos q\right)}{\left(J_1+J_2+\tilde{m}l_1^{\,2}+\tilde{m}l_2^{\,2}+2\tilde{m}l_1l_2\cos q\right)^2}+$$
$$+L^2\frac{\tilde{m}l_1l_2\sin q}{\left(J_1+J_2+\tilde{m}l_1^{\,2}+\tilde{m}l_2^{\,2}+2\tilde{m}l_1l_2\cos q\right)^2}=M. \tag{9}$$

Уравнение (9) есть полученное ранее [4 – 6] независимое уравнение динамики относительного движения рассматриваемой системы.

Будучи линеаризовано в окрестности положения $q=0$, уравнение (9) примет вид:

$$\ddot{q}\frac{\left(J_1+\tilde{m}l_1^{\,2}\right)\left(J_2+\tilde{m}l_2^{\,2}\right)-\tilde{m}^2l_1^{\,2}l_2^{\,2}}{\left(J_1+J_2+\tilde{m}l_1^{\,2}+\tilde{m}l_2^{\,2}+2\tilde{m}l_1l_2\right)}+qL^2\frac{\tilde{m}l_1l_2}{\left(J_1+J_2+\tilde{m}l_1^{\,2}+\tilde{m}l_2^{\,2}+2\tilde{m}l_1l_2\right)^2}=M\,. \tag{10}$$

В отсутствие управляющего момента в шарнире $M=0$ уравнение (10) принимает вид уравнения гармонического осциллятора

$$\ddot{q}+\omega^2q=0, \tag{11}$$

где собственная частота определяется соотношением

$$\omega=\sqrt{\frac{\tilde{m}l_1l_2}{\left(\left(J_1+\tilde{m}l_1^{\,2}\right)\left(J_2+\tilde{m}l_2^{\,2}\right)-\tilde{m}^2l_1^{\,2}l_2^{\,2}\right)\left(J_1+J_2+\tilde{m}l_1^{\,2}+\tilde{m}l_2^{\,2}+2\tilde{m}l_1l_2\right)}}L\,. \tag{12}$$

Уравнение (11) допускает наглядную физическую интерпретацию. Пусть система начинает движение с нулевой относительной начальной скоростью $\dot{q}^{(0)}=0$ и начальным отклонением в шарнире $q^{(0)}$ в пределах, допускающих линеаризацию, т.е. использование уравнения (11). Тогда в соответствии с (4) постоянный кинетический момент системы определяется соотношением

$$L=\dot{\varphi}_1^{(0)}J_C, \tag{13}$$

где $J_C=\left(J_1+J_2+\tilde{m}l_1^{\,2}+\tilde{m}l_2^{\,2}+2\tilde{m}l_1l_2\cos q^{(0)}\right)$ – момент инерции относительно центра масс системы, «отвердевшей» в конфигурации $q^{(0)}$.

Таким образом, кинетический момент системы в этом случае есть кинетический момент твердого тела с моментом инерции J_C, вращающегося вокруг центра масс с постоянной скоростью $\dot{\varphi}_1^{(0)}$. Данное движение будет иметь место в случае, если зафиксировать шарнирную степень подвижности в положении $q^{(0)}$ и придать несущему телу начальную угловую скорость $\dot{\varphi}_1^{(0)}$. С приемлемой для предварительных оценок степенью условности можно интерпретировать данное движение как перемещение роботизированного модуля с грузом в схвате манипулятора. Если теперь снять фиксацию шарнирной степени подвижности, то в отсутствие управляющего момента в шарнире $M=0$ система в соответствии с уравнением (11) будет совершать свободные гармонические колебания с частотой, определяемой следующим из (4) и (12) соотношением

$$\omega=\dot{\varphi}_1^{(0)}\sqrt{\frac{\tilde{m}l_1l_2\left(J_1+J_2+\tilde{m}l_1^{\,2}+\tilde{m}l_2^{\,2}+2\tilde{m}l_1l_2\cos q^{(0)}\right)^2}{\left(\left(J_1+\tilde{m}l_1^{\,2}\right)\left(J_2+\tilde{m}l_2^{\,2}\right)-\tilde{m}^2l_1^{\,2}l_2^{\,2}\right)\left(J_1+J_2+\tilde{m}l_1^{\,2}+\tilde{m}l_2^{\,2}+2\tilde{m}l_1l_2\right)}}\,. \tag{14}$$

Таким образом, частота собственных шарнирных колебаний системы, возникающих при ненулевом начальном кинетическом моменте L, нулевой относительной начальной скорости $\dot{q}^{(0)} = 0$ и ненулевом начальном отклонении $q^{(0)}$ от положения относительного равновесия $q = 0$ есть линейная функция начальной угловой скорости $\dot{\varphi}_1^{(0)}$ «отвердевшей» в положении $q^{(0)}$ системы.

Фазовый портрет нелинейного уравнения (9), для $M = 0$ имеющего вид

$$\ddot{q}\frac{\left(J_1+\tilde{m}l_1^{\,2}\right)\left(J_2+\tilde{m}l_2^{\,2}\right)-\tilde{m}^2l_1^{\,2}l_2^{\,2}\cos^2 q}{\left(J_1+J_2+\tilde{m}l_1^{\,2}+\tilde{m}l_2^{\,2}+2\tilde{m}l_1l_2\cos q\right)}+\dot{q}^2\frac{\tilde{m}l_1l_2\sin q\left(J_1+\tilde{m}l_1^{\,2}+\tilde{m}l_1l_2\cos q\right)\left(J_2+\tilde{m}l_2^{\,2}+\tilde{m}l_1l_2\cos q\right)}{\left(J_1+J_2+\tilde{m}l_1^{\,2}+\tilde{m}l_2^{\,2}+2\tilde{m}l_1l_2\cos q\right)^2}+$$

$$+L^2\frac{\tilde{m}l_1l_2\sin q}{\left(J_1+J_2+\tilde{m}l_1^{\,2}+\tilde{m}l_2^{\,2}+2\tilde{m}l_1l_2\cos q\right)^2}=0, \qquad (15)$$

при численных значений массо-инерционных и геометрических параметров

$$m_1 = 10\ кг,\ m_2 = 10\ кг,\ J_1 = 1\ кг\cdot м^2,\ J_2 = 1\ кг\cdot м^2,\ l_1 = 1\ м,\ l_1 = 1\ м, \qquad (16)$$

и кинетическом моменте $L = 22\ \frac{кг\cdot м^2}{c}$ приведен на рис. 1.

Рисунок 1 иллюстрирует наличие при ненулевом кинетическом моменте системы двух разделяемых сепаратрисой групп фазовых траекторий, соответствующих колебаниям и круговращениям.

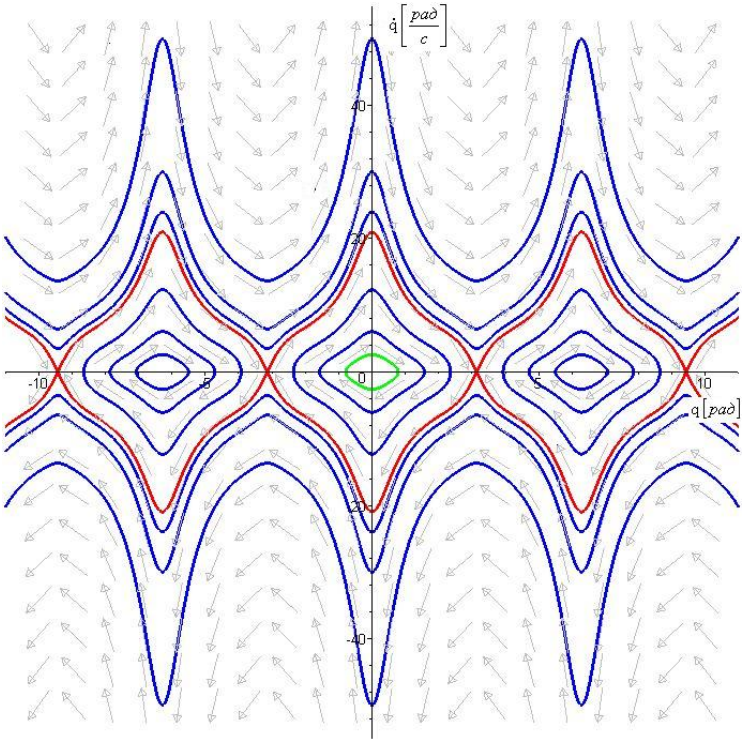


Рисунок 1 – фазовый портрет уравнения (15) при значениях параметров (16) и $L = 22\ \frac{кг\cdot м^2}{c}$

Внутри ограничиваемой сепаратрисой области имеют место обусловленные наличием ненулевого кинетического момента периодические колебательные движения в шарнире (рис. 2).

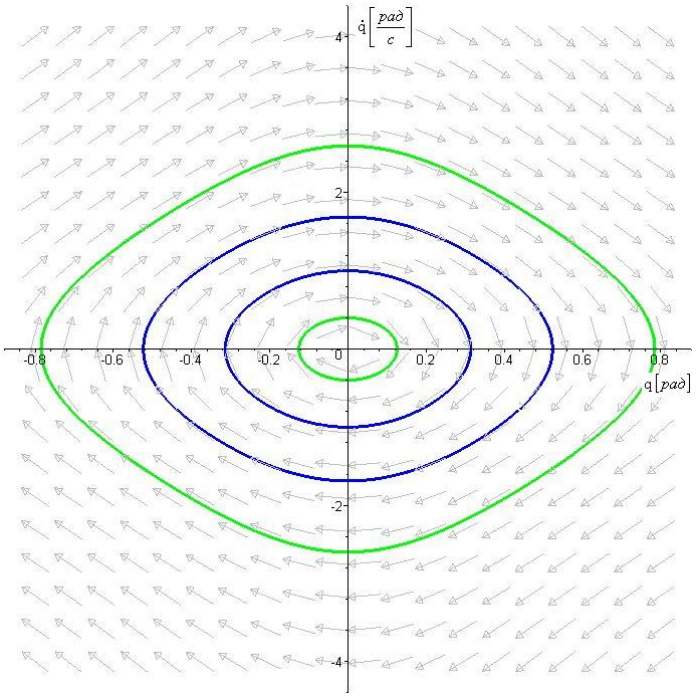


Рисунок 2 – периодические колебательные движения в шарнире, обусловленные наличием ненулевого кинетического момента

При весьма малых отклонениях q от положения $q = 0$ фазовые траектории представляют собой семейство эллипсов (рис. 3), соответствующих гармоническим колебаниям, описываемым уравнением (11).

Заключение

1. В рамках сформулированное ранее [4 – 6] модельной задачи независимое уравнение динамики относительного движения одностепенного космического манипулятора на подвижном основании, полученное в [4 – 6] преобразованием исходной системы уравнений с использованием первых интегралов, являющихся следствием постоянства количества движения и момента количества движения системы в отсутствие внешних сил и моментов, в настоящей работе получено как независимое уравнение Рауса.

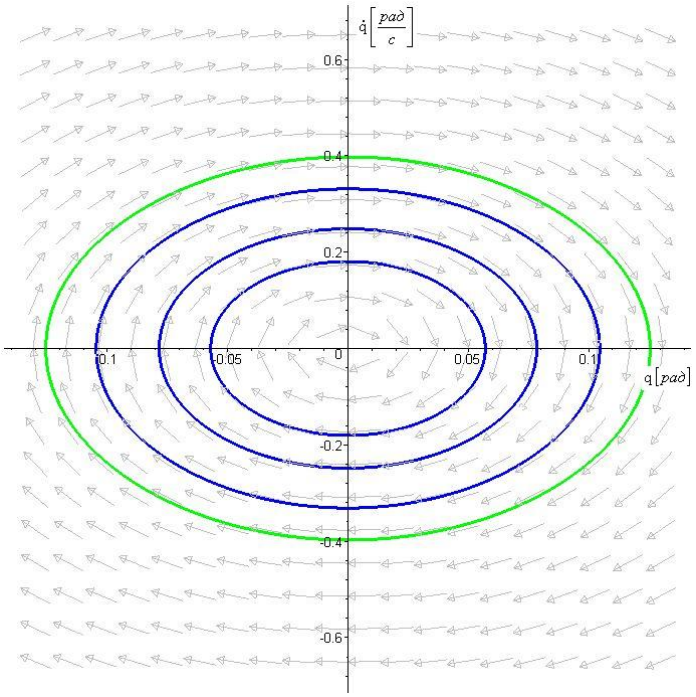


Рисунок 3 – гармонические колебания при малых отклонениях от положения $q = 0$

Предложенный подход представляет методический интерес применительно к исследованию класса космических систем, идеализируемых механической расчетной схемой вида «подвижное основание – манипуляционный механизм – полезный груз», например, монтажно-сервисных автономных роботизированных космических модулей.

2. Дана наглядная физическая интерпретация полученного уравнения, линеаризованного в окрестности положения относительного равновесия q=0, основанная на представлении постоянного кинетического момента системы как кинетического момента системы, «отвердевшей» в некотором положении и вращающейся с постоянной угловой скоростью.

3. С использованием полученного уравнения выполнен качественный анализ плоских инерционных движений одностепенного космического манипулятора. Показана возможность существенно различающихся режимов свободного движения – колебательного и круговращательного.

Полученные результаты позволяют проводить классификацию фазовых траекторий в зависимости от геометрических и массо-инерционных параметров системы, а также начальных условий движения. Могут быть использованы для построения управляющих воздействий с учетом особенностей свободных инерционных движений системы «подвижное основание – манипуляционный механизм – полезный груз».

1. Белоножко П.П. Перспективные монтажно-сервисные роботизированные космические модули // Робототехника и техническая кибернетика. 2015. – № 2(7). – С. 18 – 23.
2. Смольников Б.А. Проблемы механики и оптимизации роботов. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1991. – 232 с.
3. Лурье А. И. Аналитическая механика / А. И. Лурье. — М. : Физматгиз, 1961. — 824 с.
4. Белоножко П.П., Карпенко А.П., Фоков А.А. Некоторые особенности динамики космической системы «Подвижное основание – манипулятор – полезная нагрузка» // Международная научно-техническая конференция «Экстремальная робототехника»: тр. СПб.: Изд-во «Политехника-сервис», 2014. С. 172-181.
5. Артеменко Ю.Н., Белоножко П.П., Карпенко А. П., Фоков А.А. Исследование особенностей наведения массивной полезной нагрузки при помощи космического манипулятора с учетом подвижности основания в режиме отсутствия внешних сил // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2014. № 12. С. 669 691. DOI: 10.7463/0815.9328000.
6. Artemenko Yu.N., Karpenko A.P., Belonozhko P.P. Features of manipulator dynamics modeling into account a movable platform // Smart electromechanical systems. Studies in Systems, Decision and Control 49. A.E. Gorodetskiy (ed.) – Springer International Publishing Switzerland, 2016 – P. 177 – 190. DOI 10.1007/978-3-319-27547-5_17.

V.Ya. Vilisov

RISK PRONENESS ESTIMATION METHOD DEVELOPED IN RELATION TO THE DECISION TAKER THAT CONTROLS THE ROBOTIC SYSTEM

Energy IT LLP, Korolyov city, Moscow region
vvib@yandex.ru

Abstract

This work suggests the estimation method developed in relation to the position of the robotic system (RS) operator, showing his degree of risk proneness. The base models are: Hurwitz pessimism/optimism criterion and decision trees. The problem is solved using the reverse setting: we estimate pessimism/optimism parameter of the operator (decision taker) by observing what decisions he makes when controlling the RS. The solution context of such decision taker position estimation problems can be: using RS in emergency situations, in military actions and other situations connected with the uncertainty of the situation.

Keywords: Robotic system, risk, Hurwitz criterion, decision tree, reverse problem, estimation.

Introduction

Currently, operator-controlled robotic systems (RS) are widely used in a large application sphere such as emergency situations, space programs, military actions, medicine and some other spheres of RS application [1-4]. Everywhere in such applications the robot is a special manipulator providing the operator with more possibilities to influence the object of the manipulation. As a rule, all decisions in the situations occurring with RS are made by the operator who is actually a person that makes the decisions (decision taker) and the RS is actually his avatar, providing him with functionally new actuators and additional sensors that widen his basic capacities.

When applying RS in emergency situations (ES) or in conditions of active resistance (for example during the active military actions or space missions), the most important role is played by the time factor. It means that the operator always has to choose either he should spend some time on the situation update and analysis or he should act, using his experience and intuition, i.e. to use the RS to perform the assignment. Functions that assess the condition of the operating environment of the RS as well as some special operations are often performed by different specialized RS [5].

At that, the RS operators possess different level of experience, intuition, competence and risk proneness. Risk proneness position of the decision taker can range from extreme caution (pessimistic position) to high risk (optimistic position).

Current tendencies of RS development going in direction of their intellectualization [6] and higher degree of independence [7] make the tasks of providing RS with such abilities as significant as the presence of an effective operator is. In this connection we deem important the research [8, 9] that is aimed at construction of models referring to different aspects of controlling (managerial) activity performed by an effective operator for their further use in independent effective RS. This work considers one of aspects used for building such models, which is the estimation (identification) of the risk proneness degree (position) of the RS operator calculated by observing the decisions he makes.

Problem Set-Up

For the purposes of contextual certainty we shall take ES divisions that perform search & rescue and abandonment works at chemical or radioactive dangerous objects as an example. In such situations time is against the rescue workers, so that operators should make a choice on the basis of current situation: either they should perform additional situation appraisal or send the executor RS directly. After additional appraisal such dilemma appears again. A very cautious operator can perform additional appraisal for a long time not sending executor robots. A risky operator can send several robots at once to perform the task, and the further inspection will either prove him right or wrong. As a rule, experience and competence of the operator being the decision taker should provide maximum effectiveness of rescue operations. When the operator makes a decision, the degree of his risk proneness can be justified (i.e. providing an acceptable effectiveness to the whole rescue operation) or non-justified. This gives us grounds to suggest that for some certain ES there is an acceptable (allowable, effective) risk degree when making decisions.

Thus we have a problem: what indicator should be used to measure the operator's proneness to risk and how it should be estimated when observing the decisions that are made by a specific decision taker. The formal characterization of the problem is going to be executed by using the decision trees (nature games, positional strategic games) [10, 11] and Hurwitz pessimism/optimism criterion [12], which uses the parameter (indicator) that shows the decision taker's degree of risk proneness when making decisions. The formal presentation of the suggested method shall be performed using the model example.

The operator's (decision taker) decision making problem shall be presented as a three-level decision tree (Picture 1) where the first (the lowest on the tree) outcome level (a, b, c, d) corresponds to four levels of the state of operating environment when there appeared a necessity in making a decision (a - absence of works for executor RS; b, c, d - three levels of work scope in ascending order). However, these states possessing a different degree of certainty cannot be a priori known to the operator. They can be presented, for example, as a distribution of possibilities at the multitude of discrete states. Thus, the degree of certainty may vary from complete uncertainty $(P(a) = P(b) = P(c) = P(d) = 0.25)$ to complete certainty, for example $P(a) = P(b) = P(c) = 0;\ P(d) = 1$. Further it is presumed that the decision taker cannot assess the degree of uncertainty of a current state, only feeling it intuitively, thus making a decision regarding sending (1) or not sending (0) executor RS to execute the assignments (see the second level of the decision tree).

At the third level the outcomes (a, b, c, d) have the same meaning as they have at the first one, but here some certain state (which is found by the executor RS) brings the specific values of the execution indicators (see the figures at the top of the tree) such as an area of the extinguished fire or a volume of the resource that was used to execute the assignment etc. Without loss of generality, let us assume that the outcome indicators located on the decision tree have the meaning of payments that the operator tries to maximize.

If, when making decisions, the decision taker does not use any formal constructions but makes his choice on the basis of personal experience and intuition, then, in proportion to his accumulated experience, considering many factors and his own hierarchy of values that were obtained and changed due to his own understanding of things, the alternatives chosen by him will become more and more effective. At that let us assume that there is a reverse connection existing, for example, in the form of posterior estimation of effectiveness of his actions taken when making decisions in relation to the situation or within some period of

time. Such estimation of effectiveness can be performed by the senior control level, by an authorized person or collectively by some group of people.

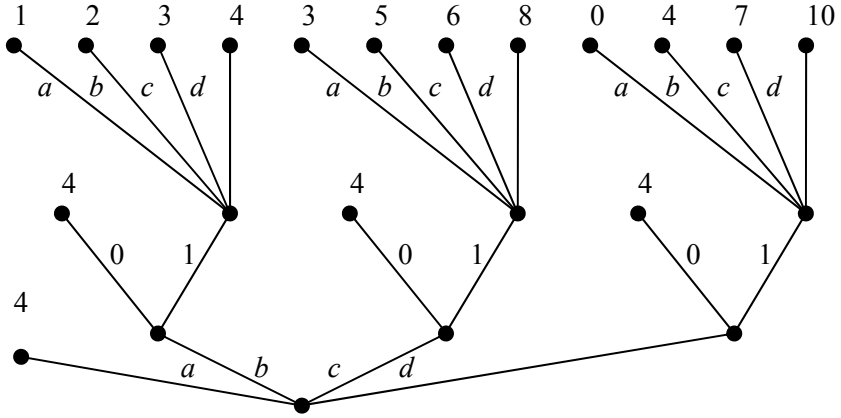


Figure 1 – RS Control Decision Tree

Solution

Let us consider the totality of the decision choice criteria presented by the combined Hurwitz criterion, on the basis of which we shall build the procedure of discovering the decision taker's position. The observations that we use herein are the "good" (effective) decisions used for building the choice model presented by the decision tree (see Picture 1). Within the multistep procedures of decision making, the algorithm of decision taker position identification shall be presented as a following sequence of stages.

Stage 1. To execute the decision tree normalization procedure (presenting the problem in the normal form: as a matrix or a table) using one of existing methods [12]. At that the payments shall be presented as a payment matrix $A = \|a_{hj}\|_{mn}$ where m is a value of pure strategies of the decision taker (lines) and n is a value of nature conditions (columns).

Stage 2. To build the dependency (from λ parameter) of the good strategy $f(\lambda)$ that was obtained using the Hurwitz criterion:

$$V = \max_i L(i) = \max_i \left(\lambda \min_j a_{ij} + (1-\lambda) \max_j a_{ij} \right), \quad (1)$$

for example, by changing λ parameter at some regular grid within [0;1] interval. As a result of such calculations, we shall build the dependency $f(\lambda)$, with the help of which the reverse $\lambda(f)$ shall be built.

Stage 3. Using the statistical data gathered when observing "good" decisions of the decision taker, i.e. using the most probable strategy f out of all he would apply, and on the basis of reverse dependency $\lambda(f)$ we shall compute the λ parameter that will correspond to the decision taker's position.

Let us consider the realization of the algorithm taking into account model data presented at Picture 1.

For applying the algorithm of decision taker position identification let us generate implementations of the decisions (Table 1) made by the decision taker in the imitation mode for the following probabilities of nature conditions at the first and third steps: $P(a) = 0.3$; $P(b) = 0.3$; $P(c) = 0.3$; $P(d) = 0.1$. At that we shall assume that the decision taker possesses adequate experience, which allows us to consider all his decisions as "good" ones; thus they can be used in the statistical estimation. In the imitation mode we shall set $\lambda = 0.7$, i.e. the decision taker's position is close to cautious (here it is necessary to mention that $\lambda = 1$ corresponds to the position of extreme caution and extreme pessimism, while $\lambda = 0$ corresponds to the position of extreme optimism). Table 1 contains a segment of the simulated condition observation sample (conditions of nature, operating environment), decisions made by the decision taker and final payment (effect).

Table 1. Segment of Observation Sample

Observations	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Step 1 (Nature)	b	b	d	c	b	b	b	b	c	b	b	c	d	c	d
Step 2 (Decision Taker)	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0
Step 3 (Nature)	c	a	d	d	c	c	a	b	a	c	b	a	c	d	b
Payment	**4**	**4**	**4**	**8**	**4**	**4**	**4**	**4**	**3**	**4**	**4**	**3**	**4**	**8**	**4**

After having understood the state of the nature at the first step of the tree, it is possible to present the action of the operator as a strategy vector:

$$f = \begin{bmatrix} i \\ j \\ k \end{bmatrix}, \qquad i, j, k \in \{0; 1\}, \tag{2}$$

where 0 and 1 are the alternatives, basing on which the decision taker makes a choice (see Picture 1 and Table 1) provided that at the first step the state was b, c, d correspondingly. In this case eight strategies are possible, and the RS operator uses one of them:

$$f_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix};\ f_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix};\ f_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix};\ f_4 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix};\ f_5 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix};\ f_6 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix};\ f_7 = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix};\ f_8 = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}. \tag{3}$$

Using the implementation shown in Table 1 we can see that if at the first step the nature is in b or in d condition, the decision taker chooses the 0 alternative; and if the nature is c, he chooses the 1 alternative, which means that he uses f_3 strategy.

Further we shall execute the stage-by-stage algorithm provided above.

Stage 1. Here we shall execute the decision tree normalization procedure. For this we have to determine the set elements of pure strategies of the decision taker and set elements of the nature conditions. The decision taker strategies have already been defined by the correlation (3). The multitude of nature conditions shall be defined as a multitude of combinations pertaining to outcomes of the first and the third steps, excluding the outcome a at the first step as here the decision taker does not make any decisions. Thus, nature can have one out of 12 states with each of them presented as a vector of possible states of the operating environment at the first and the second steps of the decision tree correspondingly: $s_j = [x \quad y]^T$ where T is a conjugation symbol; $x \in \{b, c, d\}$; $y \in \{a, b, c, d\}$. Then the whole set of states will be the following:

$$\left.\begin{aligned} &s_1 = \begin{bmatrix} b \\ a \end{bmatrix};\ s_2 = \begin{bmatrix} b \\ b \end{bmatrix};\ s_3 = \begin{bmatrix} b \\ c \end{bmatrix};\ s_4 = \begin{bmatrix} b \\ d \end{bmatrix};\ s_5 = \begin{bmatrix} c \\ a \end{bmatrix};\ s_6 = \begin{bmatrix} c \\ b \end{bmatrix}; \\ &s_7 = \begin{bmatrix} c \\ c \end{bmatrix};\ s_8 = \begin{bmatrix} c \\ d \end{bmatrix};\ s_9 = \begin{bmatrix} d \\ a \end{bmatrix};\ s_{10} = \begin{bmatrix} d \\ b \end{bmatrix};\ s_{11} = \begin{bmatrix} d \\ c \end{bmatrix};\ s_{12} = \begin{bmatrix} d \\ d \end{bmatrix}. \end{aligned}\right\} \tag{4}$$

Let us show the payments that correspond to the outcomes of the decision tree as Table 2, where, for purposes of brevity, we shall present the states using only a pair of their coordinate values.

Table 2. Normalized Payment Matrix

		s_j											
		ba	bb	bc	bd	ca	cb	cc	cd	da	db	dc	dd
f_h	000	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
	001	3	3	3	3	3	3	3	3	0	4	7	10
	010	4	4	4	4	3	5	6	8	4	4	4	4
	011	4	4	4	4	3	5	6	8	0	4	7	10
	100	1	2	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4
	101	1	2	3	4	4	4	4	4	0	4	7	10
	110	1	2	3	4	3	5	6	8	4	4	4	4
	111	1	2	3	4	3	5	6	8	0	4	7	10

Stage 2. In order to build the dependency of f good strategy from the parameter λ of the Hurwitz criterion (1), we shall vary it with the 0.1 step at the interval [0; 1], computing the values of objective function $L(i)$ for each step. The computational results are provided in Table 3.

The last line in the table is the table record of $f(\lambda)$ function, where we can see that the reverse dependency $\lambda(f)$ is a multidigit one, i.e. one value of the argument corresponds to the interval of values, for example f_1 corresponds to the value interval of λ ranging from 0.8 to 1.0.

Stage 3. On the basis of the statistical data gathered from the alternative choice observations of the decision taker (see Table 1) we can deduce that the decision taker follows the f_3 strategy. And the table dependency $\lambda(f)$ shows that the coefficient of the Hurwitz criterion that reflects the decision taker's position is located within [0.5; 0.7] interval which complies with the original modelling data (we have set the $\lambda = 0.7$ value). The reverse problem has been solved.

Table 3. Objective Function Values According to the Hurwitz Criterion

		λ										
		0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	**0.7**	0.8	0.9	1.0
f_h	000	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	**4.0**	**4.0**	**4.0**
	001	**10.0**	**9.0**	**8.0**	**7.0**	**6.0**	5.0	4.0	3.0	2.0	1.0	0.0
	010	8.0	7.5	7.0	6.5	**6.0**	**5.5**	**5.0**	**4.5**	**4.0**	3.5	3.0
	011	**10.0**	**9.0**	**8.0**	**7.0**	**6.0**	5.0	4.0	3.0	2.0	1.0	0.0
	100	4.0	3.7	3.4	3.1	2.8	2.5	2.2	1.9	1.6	1.3	1.0
	101	**10.0**	**9.0**	**8.0**	**7.0**	**6.0**	5.0	4.0	3.0	2.0	1.0	0.0
	110	8.0	7.3	6.6	5.9	5.2	4.5	3.8	3.1	2.4	1.7	1.0
	111	**10.0**	**9.0**	**8.0**	**7.0**	**6.0**	5.0	4.0	3.0	2.0	1.0	0.0
$L^*(\lambda)$		10.0	9.0	8.0	7.0	6.0	5.5	5.0	4.5	4.0	4.0	4.0
$f^*(\lambda)$		f_2	f_2	f_2	f_2	f_2	f_3	f_3	f_3	f_1	f_1	f_1

Conclusions

The results obtained from the data of the model example can be explained in such a manner that having presented with the reiterated choice of decisions, the specific decision taker will receive a five unit payment on average by keeping to his f_3 strategy. At that on the basis of the reverse problem solution it is possible to conclude that his risk proneness indicator is within [0.5; 0.7] interval. If such control-obtained effect is deemed satisfactory, in the future such level of risk proneness can be considered adequate; using it as a base, RS can be equipped with the systems of decision making support applied in similar situations and/or the suggested decision making algorithm can be included in the software of the corresponding RS control system level.

Thus, the suggested approach allows to provide the risk level that is considered adequate and which was approved by the experts who evaluate quality and effectiveness of the operations performed with the use of robotic systems.

1. N.A. Rudianov, A.V. Ryabov, V.S. Khruschov Land Robotic Systems Being the Defense Element of Objects and Territory of the Russian Federation // Book of reports of the Russian National Scientific and Technological Conference "Extreme Robotics", Saint Petersburg: Politekhnika-Service, 2015, pp. 16-17.
2. S.G. Tsarichenko, A.V. Ivanov, Yu.N. Osipov, A.Yu. Kartenichev, V.I. Yershov Peculiarities of UAS Application by the Ministry of Emergencies // Book of reports of the Russian National Scientific and Technological Conference "Extreme Robotics", Saint Petersburg: Politekhnika-Service, 2015, pp. 24-29.
3. S.R. Lysyi Scientific and Technological Problems and Perspectives of Development of Special (Space) Robotics // Book of reports of the Russian National Scientific and Technological Conference "Extreme Robotics", Saint Petersburg: Politekhnika-Service, 2015, pp. 29-34.
4. K.Ye. Senchik, V.V. Kharlamov, N.A. Gryaznov, A.V. Lopota On Peculiarities of Robotics Application in Medicine // Book of reports of the Russian National Scientific and Technological Conference "Extreme Robotics", Saint Petersburg: Politekhnika-Service, 2015, pp. 40-43.
5. I.A. Kalyayev, S.G. Kapustyan Problems of Robotic Group Control // Mechatronics, Automation, Control, No. 6, 2009, pp. 33-40.
6. M.V. Lokhin, S.V. Manko, M.P. Romanov Increasing Adaptive Functions of Autonomous Robots on the Base of Intellectual Technologies // Book of reports of the Russian National Scientific and Technological Conference "Extreme Robotics", Saint Petersburg: Politekhnika-Service, 2015, pp. 63-67.
7. A.A. Zhdanov Independent Artificial Intellect. - Moscow: BINOM, 2008, p. 359.
8. V.Ya. Vilisov On Robot Algorithms Adapted to the Target Preferences of the Decision Taker // Book of reports of the Russian National Scientific and Technological Conference "Extreme Robotics", Saint Petersburg: Politekhnika-Service, 2012, pp. 120-126.
9. V.Ya. Vilisov Adaptive Choice of Managerial Decisions. Operation Examination Models as the Means of Storing the Decision Taker's Knowledge - Saarbruecken (Germany): LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011, p. 376.

10. G. Raifa Decision Analysis. - Moscow: Nauka, 1977, p. 408.
11. Guillermo Owen Game Theory. - Moscow: Mir, 1971. - p. 230.
12. Hamdy A. Taha Introduction to Operations Research: Translation from English - Moscow: Williams Publishing House, 2005, p. 912.

В.Я. Вилисов

МЕТОД ОЦЕНИВАНИЯ СКЛОННОСТИ К РИСКУ ЛПР, УПРАВЛЯЮЩЕГО РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ

ООО «Энергия ИТ», Московская область, г. Королёв
vvib@yandex.ru

Аннотация

Предложен метод оценивания позиции оператора робототехнической системой (РТС), как степени склонности к риску. В качестве базовых моделей использованы критерий пессимизма-оптимизма Гурвица и деревья решений. Задача решается в обратной постановке – по наблюдениям за действиями оператора (ЛПР) при принятии им решений по управлению РТС оценивается его параметр пессимизма-оптимизма. Контекстом решения подобных задач оценивания позиции ЛПР могут быть использование РТС в чрезвычайных ситуациях, при боевых действиях и в других ситуациях неопределенности среды.

Ключевые слова: робототехническая система, риск, критерий Гурвица, дерево решений, обратная задача, оценивание.

Введение

Робототехнические системы (РТС), управляемые операторами, в настоящее время широко распространены в большом спектре применений – в чрезвычайных ситуациях, в космических программах, при боевых действиях, в медицине и в ряде других сфер применения РТС [1-4]. Всюду в таких приложениях робот фактически является специальным манипулятором, дающим оператору больше возможностей для воздействия на предмет (объект) манипулирования. Все решения в возникающих ситуациях, как правило, в таких РТС принимаются оператором, который фактически является лицом, принимающим решения (ЛПР), а сама РТС является по существу его аватаром, обеспечивающим его функционально новыми, расширяющими его базовые возможности, актуаторами и дополнительной сенсорикой.

Для задач применения РТС в чрезвычайных ситуациях (ЧС) или в условиях активного противодействия, например, в условиях ведения боевых действий, в космических экспедициях фактор времени играет важную роль. А это значит, что оператор практически всегда стоит перед дилеммой – потратить часть времени на уточнение и прогнозирование ситуации или, используя свой опыт и интуицию, действовать – использовать РТС для выполнения задания. Функции оценивания состояния операционной среды РТС и специальные операции часто выполняются различными специализированными РТС [5].

Операторы РТС при этом обладают разным опытом, интуицией, профессионализмом и склонностью к риску. Позиция ЛПР по степени склонности к риску может варьироваться от крайней осторожности (пессимистическая позиция) до высокой рисковости (оптимистическая позиция).

Современные тенденции развития РТС в направлении их интеллектуализации [6] и большей автономности [7] делают актуальными задачи наделения РТС способностями не менее существенными, чем эффективный оператор. В этой связи важными представляются исследования [8, 9], направленные на построение моделей различных аспектов управленческой деятельности эффективных операторов для последующего их использования в автономных эффективных РТС. В настоящей работе рассматривается один из аспектов построения таких моделей – оценивание (идентификация) степени склонности к риску (позиции) оператора РТС по наблюдениям за его решениями.

Постановка задачи

Для контекстной определенности рассмотрим, например, ЧС, в которой проводятся поисково-спасательные и ликвидационные работы на химически или радиационно опасных объектах. В таких ситуациях время работает против спасателей, и операторы по текущей ситуации должны делать выбор: выполнить доразведку состояния объекта или сразу отправить исполнительные РТС.

После доразведки подобна дилемма возникает вновь. Очень осторожный оператор может сколь угодно долго циклить на доразведке, не посылая исполнительных роботов. Рисковый оператор может сразу отправить исполнительных роботов на выполнение задания, при этом последующая инспекция может подтвердить его правоту либо констатировать ошибочность принятого решения. Опыт и квалификация оператора, как ЛПР, должны, как правило, обеспечивать максимальную эффективность спасательных операций. Тот или иной уровень склонности оператора к риску при принятии решений может быть оправданным (т.е. обеспечивающим приемлемую эффективность всей спасательной операции) или неоправданным. А это дает основание предположить, что для определенных видов ЧС существует приемлемый (допустимый, эффективный) уровень риска при принятии решений.

Таким образом возникает задача – каким показателем измерить склонность оператора к риску и как его оценить по наблюдениям за решениями, принимаемыми конкретным ЛПР. Формализацию задачи выполним на основе использования деревьев решений (игр с природой, позиционных стратегических игр) [10, 11] и критерия пессимизма-оптимизма Гурвица [12], в котором используется параметр (показатель), отражающий степень склонности ЛПР к риску при принятии решений. Формализованное представление предлагаемого метода выполним на модельном примере.

Задачу выбора решений оператором (ЛПР) представим в виде трехуровневого дерева решений (рис. 1), где первый (нижний на дереве) уровень исходов (a, b, c, d) соответствует четырем уровням состояния операционной зоны на момент возникновения потребности в принятии решения (a – отсутствие фронта работ для исполнительных РТС; b, c, d – три градации объемов работ в порядке возрастания). Однако эти состояния априори могут быть известны оператору с различной степенью достоверности, которую можно представить, например, распределением вероятностей на множестве дискретных состояний. Так степень определенности может варьироваться от полной неопределенности $(P(a) = P(b) = P(c) = P(d) = 0.25)$ до полной определенности, например, $P(a) = P(b) = P(c) = 0;\ P(d) = 1$. Далее предполагается, что степень неопределенности текущего состояния ЛПР количественно может не оценивать, а "чувствовать" интуитивно и на этой основе принимать решение об отправке (1) или неотправке (0) исполнительных РТС на выполнение заданий (см. второй уровень дерева решений).

На третьем уровне исходы (a, b, c, d) имеют тот же смысл, что и на первом, однако, то или иное конкретное состояние, с которым сталкиваются исполнительные РТС приводит к конкретным значениям показателей исполнения (см. цифры на конечных вершинах дерева), например, площадь погашенного пожара или объем ресурса, использованного для выполнения задания и т.п. Без потери общности будем считать, что показатели исходов на дереве решений имеют смысл платежей, которые оператор старается максимизировать.

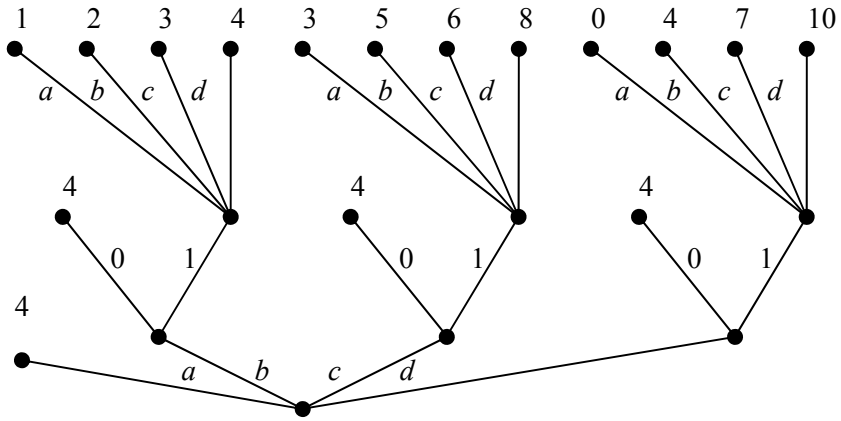


Рисунок 1 – Дерево решений при управлении РТС

Если ЛПР, принимая решения, не пользуется какими-либо формальными конструкциями, а строит свой выбор на основе личного опыта и интуиции, то по мере накопления опыта, с учетом многих факторов и своей иерархии ценностей, преломленных через собственное восприятие, выбранные им альтернативы будут становиться все более эффективными. При этом будем предполагать, что существует обратная связь, например, в форме апостериорной оценки эффективности его действий при принятии решений для данной ситуации или за некоторый период

времени. Такое оценивание эффективности может выполняться вышестоящим уровнем управления или полномочным лицом, или коллегиально группой лиц.

Решение

Рассмотрим совокупность критериев выбора решений, представляемых комбинированным критерием Гурвица, на основании которого и построим процедуру выявления позиции ЛПР по данным наблюдения за "хорошими" (эффективными) принятыми решениями для модели выбора в виде дерева решений (см. рис. 1). Алгоритм распознавания позиции ЛПР в многошаговых процедурах выбора решений представим в виде следующей последовательности этапов.

Этап 1. Выполнить процедуру нормализации дерева решений (представить задачу в нормальной форме - матрицей или таблицей) одним из существующих способов [12]. При этом платежи будут представлены матрицей платежей $A = \|a_{hj}\|_{mn}$, где m - число чистых стратегий ЛПР (строки), n - число состояний природы (столбцы).

Этап 2. Построить зависимость (от параметра λ) оптимальной стратегии $f(\lambda)$, полученной по критерию Гурвица:

$$V = \max_i L(i) = \max_i \left(\lambda \min_j a_{ij} + (1-\lambda) \max_j a_{ij} \right), \qquad (1)$$

например, варьируя параметр λ на некоторой регулярной сетке в интервале [0; 1]. В результате таких расчетов будет построена зависимость $f(\lambda)$, а по ней и обратная $\lambda(f)$.

Этап 3. По статистическим данным наблюдений за "хорошими" решениями ЛПР, т.е. по наиболее вероятной из используемых им стратегий f, на основании обратной зависимости $\lambda(f)$ вычислить параметр λ, который и будет соответствовать позиции ЛПР.

Рассмотрим реализацию этого алгоритма с учетом модельных данных, представленных на рис. 1.

Для применения алгоритма распознавания позиции ЛПР выполним генерацию реализации решений (табл. 1), принятых ЛПР в режиме имитации для следующих вероятностей состояний природы на первом и третьем шагах: $P(a) = 0.3$; $P(b) = 0.3$; $P(c) = 0.3$; $P(d) = 0.1$. При этом будем считать, что ЛПР уже достаточно опытен, что позволяет считать все его решения "хорошими", а значит, все они могут быть использованы в статистических оценках. В режиме имитации зададим $\lambda = 0.7$, т.е. позиция ЛПР более близка к осторожной (заметим, что $\lambda = 1$ соответствует позиции крайней осторожности, крайнего пессимизма, а $\lambda = 0$ – позиции крайнего оптимизма). В табл. 1 приведен фрагмент имитируемой выборки наблюдений за состояниями (природы, операционной среды), принятыми оператором решениями и конечным платежом (эффектом).

Таблица 1. Фрагмент выборки наблюдений

Наблюдения	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Шаг 1 (природа)	b	b	d	c	b	b	b	b	c	b	b	c	d	c	d
Шаг 2 (ЛПР)	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0
Шаг 3 (природа)	c	a	d	d	c	c	a	b	a	c	b	a	c	d	b
Платеж	**4**	**4**	**4**	**8**	**4**	**4**	**4**	**4**	**3**	**4**	**4**	**3**	**4**	**8**	**4**

Имея представление о том, в каком состоянии находится природа на первом шаге дерева, можно представить действие оператора в виде вектора стратегии:

$$f = \begin{bmatrix} i \\ j \\ k \end{bmatrix}, \qquad i, j, k \in \{0; 1\}, \qquad (2)$$

где 0 и 1 - альтернативы, из которых выбирает ЛПР (см. рис. 1 и табл. 1), при условии, что на первом шаге состояние было соответственно b, c, d. Тогда возможны восемь стратегий, одной из которых и пользуется оператор РТС:

$$f_1 = \begin{bmatrix}0\\0\\0\end{bmatrix};\ f_2 = \begin{bmatrix}0\\0\\1\end{bmatrix};\ f_3 = \begin{bmatrix}0\\1\\0\end{bmatrix};\ f_4 = \begin{bmatrix}0\\1\\1\end{bmatrix};\ f_5 = \begin{bmatrix}1\\0\\0\end{bmatrix};\ f_6 = \begin{bmatrix}1\\0\\1\end{bmatrix};\ f_7 = \begin{bmatrix}1\\1\\0\end{bmatrix};\ f_8 = \begin{bmatrix}1\\1\\1\end{bmatrix}. \quad (3)$$

По реализации, приведенной в табл. 1, видно, что если на первом шаге природа находится в состоянии b или d, то ЛПР выбирает альтернативу 0, если же c, то альтернативу 1, а это значит, что он пользуется стратегией f_3.

Далее реализуем алгоритм, приведенный выше, по этапам.

Этап 1. Выполним нормализацию дерева решений. Для этого необходимо определить элементы множества чистых стратегий ЛПР и элементы множества состояний природы. Стратегии ЛПР уже определены соотношением (3). Множество состояний природы определится как множество сочетаний исходов первого и третьего шага, за исключением исхода a на первом шаге, т.к. при нем ЛПР не принимает каких-либо решений. Таким образом, природа может находиться в одном из 12 состояний, каждое из которых представим вектором возможных состояний операционной среды, соответственно, на первом и втором шагах дерева решений: $s_j = [x \quad y]^T$, где T – символ транспонирования; $x \in \{b, c, d\}$; $y \in \{a, b, c, d\}$. Тогда весь набор состояний будет следующим:

$$\left.\begin{aligned} &s_1 = \begin{bmatrix}b\\a\end{bmatrix};\ s_2 = \begin{bmatrix}b\\b\end{bmatrix};\ s_3 = \begin{bmatrix}b\\c\end{bmatrix};\ s_4 = \begin{bmatrix}b\\d\end{bmatrix};\ s_5 = \begin{bmatrix}c\\a\end{bmatrix};\ s_6 = \begin{bmatrix}c\\b\end{bmatrix};\\ &s_7 = \begin{bmatrix}c\\c\end{bmatrix};\ s_8 = \begin{bmatrix}c\\d\end{bmatrix};\ s_9 = \begin{bmatrix}d\\a\end{bmatrix};\ s_{10} = \begin{bmatrix}d\\b\end{bmatrix};\ s_{11} = \begin{bmatrix}d\\c\end{bmatrix};\ s_{12} = \begin{bmatrix}d\\d\end{bmatrix}.\end{aligned}\right\} \quad (4)$$

Приведем платежи, соответствующие исходам дерева решений, в виде табл. 2, где для краткости представим состояния лишь парой значений их координат.

Таблица 2. Нормализованная платежная матрица

		s_j											
		ba	bb	bc	bd	ca	cb	cc	cd	da	db	dc	dd
f_h	000	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
	001	3	3	3	3	3	3	3	3	0	4	7	10
	010	4	4	4	4	3	5	6	8	4	4	4	4
	011	4	4	4	4	3	5	6	8	0	4	7	10
	100	1	2	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4
	101	1	2	3	4	4	4	4	4	0	4	7	10
	110	1	2	3	4	3	5	6	8	4	4	4	4
	111	1	2	3	4	3	5	6	8	0	4	7	10

Этап 2. Для построения зависимости оптимальной стратегии f от параметра λ критерия Гурвица (1) проварьируем его с шагом 0.1 на интервале [0; 1] и для каждого шага вычислим значения целевой функции $L(i)$. Результаты этих расчетов приведены в табл. 3.

Таблица 3. Значения целевой функции по критерию Гурвица

		λ										
		0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	**0.7**	0.8	0.9	1.0
f_h	000	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	**4.0**	**4.0**	**4.0**
	001	**10.0**	**9.0**	**8.0**	**7.0**	**6.0**	5.0	4.0	3.0	2.0	1.0	0.0
	010	8.0	7.5	7.0	6.5	**6.0**	**5.5**	**5.0**	**4.5**	**4.0**	3.5	3.0
	011	**10.0**	**9.0**	**8.0**	**7.0**	**6.0**	5.0	4.0	3.0	2.0	1.0	0.0
	100	4.0	3.7	3.4	3.1	2.8	2.5	2.2	1.9	1.6	1.3	1.0
	101	**10.0**	**9.0**	**8.0**	**7.0**	**6.0**	5.0	4.0	3.0	2.0	1.0	0.0
	110	8.0	7.3	6.6	5.9	5.2	4.5	3.8	3.1	2.4	1.7	1.0
	111	**10.0**	**9.0**	**8.0**	**7.0**	**6.0**	5.0	4.0	3.0	2.0	1.0	0.0
$L^*(\lambda)$		10.0	9.0	8.0	7.0	6.0	5.5	5.0	4.5	4.0	4.0	4.0
$f^*(\lambda)$		f_2	f_2	f_2	f_2	f_2	f_3	f_3	f_3	f_1	f_1	f_1

Последняя строка в этой таблице и представляет собой табличную запись функции $f(\lambda)$, откуда видно, что обратная зависимость $\lambda(f)$ многозначна, т.е. одному значению аргумента, например, f_1 соответствует интервал значений λ - от 0.8 до 1.0.

Этап 3. Из статистических данных наблюдений за выбором альтернатив ЛПР (см. табл. 1) следует, что ЛПР придерживается стратегии f_3. А из табличной зависимости $\lambda(f)$ следует, что коэффициент критерия Гурвица, отражающий позицию ЛПР лежит в интервале [0.5; 0.7], что согласуется с исходными данными моделирования (было задано значение $\lambda = 0.7$). Обратная задача решена.

Выводы

Полученные результаты на данных модельного примера можно интерпретировать таким образом, что при многократном выборе решений конкретный ЛПР, придерживаясь своей стратегии f_3, будет получать в среднем платеж в пять единиц. При этом на основании решения обратной задачи можно констатировать, что выявленный показатель его степени склонности к риску лежит на интервале [0.5; 0.7]. Если полученный эффект от такого управления будет признан удовлетворительным, то в дальнейшем подобный уровень склонности к риску может быть признан достаточным и на его основе могут быть построены системы поддержки принятия решений при управлении РТС в подобных ситуациях и/или предложенный алгоритм принятия решений может быть включен в состав программного обеспечения соответствующего уровня системы управления комплексами РТС.

Таким образом, предложенный подход позволяет обеспечить уровень риска, приемлемый и согласованный с экспертами, оценивающими качество и эффективность операций, выполняемых с применением робототехнических систем.

1. Рудианов Н.А., Рябов А.В., Хрущев В.С. Наземные робототехнические комплексы как элемент системы обороны объектов и территорий РФ // Сборник докладов Всероссийской научно-технической конференции «Экстремальная робототехника», СПб: Политехника-Сервис, 2015 г., С. 16-17.
2. Цариченко С.Г., Иванов А.В., Осипов Ю.Н., Картеничев А.Ю., Ершов В.И. Особенности применения БПЛА в интересах МЧС // Сборник докладов Всероссийской научно-технической конференции «Экстремальная робототехника», СПб: Политехника-Сервис, 2015 г., С. 24-29.
3. Лысый С.Р. Научно-технические проблемы и перспективы развития робототехники специального (космического) назначения // Сборник докладов Всероссийской научно-технической конференции «Экстремальная робототехника», СПб: Политехника-Сервис, 2015 г., С. 29-34.
4. Сенчик К.Е., Харламов В.В., Грязнов Н.А., Лопота А.В. О перспективах применения робототехники в медицине // Сборник докладов Всероссийской научно-технической конференции «Экстремальная робототехника», СПб: Политехника-Сервис, 2015 г., С. 40-43.
5. Каляев И.А., Капустян С.Г. Проблемы группового управления роботами // Мехатроника, автоматизация, управление, № 6, 2009, С. 33-40.
6. Лохин М.В., Манько С.В., Романов М.П. Повышение адаптивных свойств автономных роботов на базе интеллектуальных технологий // Сборник докладов Всероссийской научно-технической конференции «Экстремальная робототехника», СПб: Политехника-Сервис, 2015 г., С. 63-67.
7. Жданов А.А. Автономный искусственный интеллект. – М.: БИНОМ, 2008, 359 с.
8. Вилисов В.Я. Об алгоритмах адаптации робота к целевым предпочтениям ЛПР // Сборник докладов Всероссийской научно-технической конференции «Экстремальная робототехника», СПб: Политехника-Сервис, 2012 г., С. 120-126.
9. Вилисов В.Я. Адаптивный выбор управленческих решений. Модели исследования операций как средство хранения знаний ЛПР. – Саарбрюкен (Германия).: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011, 376 с.
10. Райфа Г. Анализ решений. - М.: Наука, 1977, 408 с.
11. Оуэн Г. Теория игр. - М.: Мир, 1971. - 230 с.
12. Таха Х.А. Введение в исследование операций: Пер. с англ. - М.: Изд. дом Вильямс, 2005, 912 с.

V.A. Lavrukhin, G.A. Fokin

DESIGNING THE MIMO SDR-BASED LPD TRANSCEIVER FOR LONG-RANGE ROBOT CONTROL APPLICATIONS

Bonch-Bruevich Saint Petersburg University of Telecommunications, Russia
lavrukhin@sut.ru

There is a huge growth in robot control applications over the past years. One of the main challenges in such applications is the radio link between a control point and a robot. To improve the range of the link most available control systems use 433 MHz Low Power Devices (LPD) band for communication. Required distance between a robot and control point for our application is 10 km. Achieving this distance is a challenge when multipath propagation is present. Our Matlab simulation demonstrates that 2*2 Multiple Input Multiple Output (MIMO) Alamouti scheme allows to gain more than 10 dB comparing with Single Input Single Output (SISO). Link budget calculations show that we can achieve even more than 10 km distance using 2*2 MIMO scheme. High precision Agilent hardware and SystemVue software were used for performance evaluation of the radio link and system architecture. To prototype the system we used USRP B210 Software Defined Radio (SDR) hardware due to huge variety of supportive platforms and convenient type of connectivity.

This paper describes the current University research and development (R&D) project. The main goal of the project is to develop the 2x2 MIMO SDR-based 10 km distance transceiver in the 433 MHz ISM UHF frequency band.

Current research activity analysis has shown the absence of available MIMO SDR-based long-range transceivers in 433 MHz ISM UHF band. That is why this field of R&D appears to be quite perspective. Most of existing 433 MHz band transceivers have a discrete component design. But we use the SDR solution to make the cognitive radio design possible in the future.

A small section of the ISM 70-cm band near 433 MHz is available for license exempt wireless communication using low power devices (LPDs) [1], also called short-range devices (SRDs) [2].

We use Ettus Research B210 Universal Software Radio Peripheral (USRP) hardware to achieve 10 km range for low rate telemetry exchange in robot control applications. Such a telemetry system requires only several kbps data rate to control the robot movement and has to be zero tolerant to information errors and losses [4].

In this paper we show that by using dual-antenna transmit diversity techniques based on Alamouti Space-Time Block Coding (STBC) [3] telemetry exchange can be performed reliably.

To assess the performance of the given system we used intensive simulations to evaluate BER for MIMO 2x2 Alamouti scheme that is intended to achieve 10 km range. Then we defined Eb/N0 threshold value and compute radio link budget. To verify the system performance we developed a testbed based on Agilent hardware and software. It offers a real time visualization of the signal travelling through the radio channel.

There are only few commercially available MIMO SDR solutions in the world. Most of the hardware has a 2*2 MIMO transceiver. Supported frequency range is wide enough for our aim. All the boards support 433 MHz LPD band and have a bandwidth of tens MHz. The given hardware has the similar technical characteristics. Therefore to prototype the system we have chosen the most popular and supportive Ettus Research USRP B210 platform.

USRP B210 has two receive chains and two transmit chains. It uses Analog Devices RFIC AD9361 single chip direct conversion transceiver as an integrated RF frontend. It is a cost-effective experimentation platform. B210 uses both signal chains of the AD9361 providing coherent MIMO capability, which makes it possible to develop MIMO 2x2 Alamouti scheme using the common USRP Hardware Driver (UHD) framework.

UHD is an open source, cross platform driver that can run on Windows, Linux and Mac OS. It provides a common API that is used by several software frameworks such as GNU Radio.

The onboard signal processing and control of AD9361 is performed by Spartan6 XC6SLX150 FPGA connected to a host PC using SuperSpeed USB 3.0 interface.

Multipath fading is a significant problem in radio communications. When the signal power drops dramatically, the channel is in a fade condition, which leads to high bit error rates (BER).

MIMO technology significantly improves the link performance and reliability, especially in non-line-of-sight 433 MHz robot control application environment.

Utilizing multiple element antennas (MEAs) both on transmit (Tx) and receive (Rx) sides of the communication link reveals exploitation possibility of both transmit and receive diversity schemes which

yields a high quality of reception in terms of BER with a simple maximum likelihood (ML) decoding algorithm.

Let us evaluate the performance of MIMO 2x2 Alamouti coding scheme with BPSK signal modulation in the case of slow Rayleigh fading channels when we have perfect knowledge of the channel at the receiver.

The functional diagram of the system is shown in Fig. 1. This system consists of a transmitter (Tx) and a Receiver (Rx). Each of devices includes two antennas. There is a wireless channel between Tx and Rx. The relationship between the Tx and Rx is given by (1).

$y = \mathbf{H}x + n$

where **y** is a received signal vector, **x** is a transmitted signal vector, **H** is the complex channel matrix and **n** is a noise vector [7].

The Alamouti coding scheme involves a space-time block which has a pair of symbols sent in the first symbol period, and then a modified version of these symbols in the second symbol period.

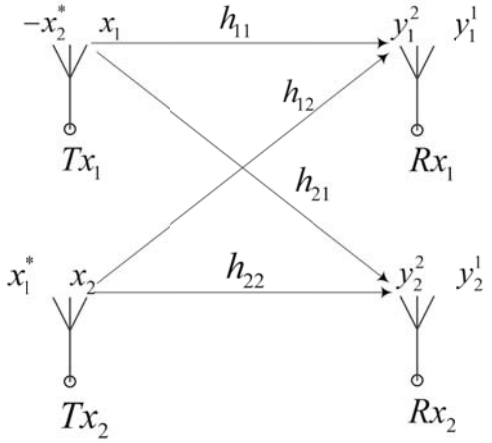


Figure 1 –MIMO System Concept

Two consecutive symbols x1 and x2 are encoded with the following space-time codeword matrix [3]:

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_1 & -x_2^* \\ x_2 & x_1^* \end{bmatrix}$$

Under the assumption that the channel experienced by each transmit antenna is flat fading and independent from the channel experienced by other transmit antenna, each transmitted symbol in (1) gets multiplied by a randomly Rayleigh varying complex number hij which is assumed to remain constant over two symbol periods:

$$\begin{bmatrix} y_1^1 \\ y_2^1 \\ y_1^{2*} \\ y_2^{2*} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \\ h_{12}^* & -h_{11}^* \\ h_{22}^* & -h_{21}^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1^1 \\ n_2^1 \\ n_1^{2*} \\ n_2^{2*} \end{bmatrix}$$

where y_1^1 and y_2^1 are the received information at 1st symbol period on 1st and 2nd receive antenna respectively; y_1^2 and y_2^2 are the received information at 2nd symbol period on 1st and 2nd receive antenna respectively; h_{ij} is the channel from i^{th} receive antenna to j^{th} transmit antenna; n_1^1 and n_2^1 are the noise at 1st symbol period on 1st and 2nd receive antenna respectively; n_1^2 and n_2^2 are the noise at 2nd symbol period on 1st and 2nd receive antenna respectively.

The diversity analysis is based on ML signal detection at the receiver side. Complex orthogonality of the Alamouti code in (2) allows to simplify the ML receiver structure. Matlab simulation was executed. Figure 2 shows the MIMO 2x2 Alamouti STBC performance in terms of BER.

It is shown in figure 2 that the BER performance for 2 receive Alamouti STBC is much better than 1 receive case. For BER=0.0001 required $(E_b/N_0)_{req}$ =10 dB (line 14 in table 1).

We calculated the radio link budget (table 1). Main loss contribution in the radio link is path loss that was determined using Okumura-Hata Model [5] and plotted in Fig 3. We have chosen Ls = 150 dB (line 4 in table II) as an operating point for rural area, because this is a primary area for our robot control application.

Hardware gains include B210 transmitter power P_t = -20 dBW (10 mW) (line 1 in table 1), selected Tx antenna gain G_t = 12 dBi, selected Rx antenna gain G_r = 6 dBi.

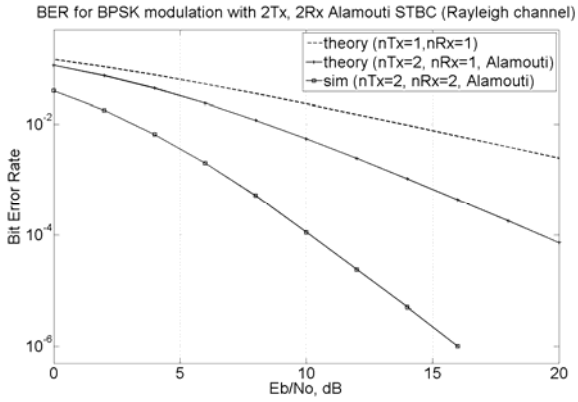


Figure 2 –BER plot for 2 transmit 2 receive Alamouti STBC

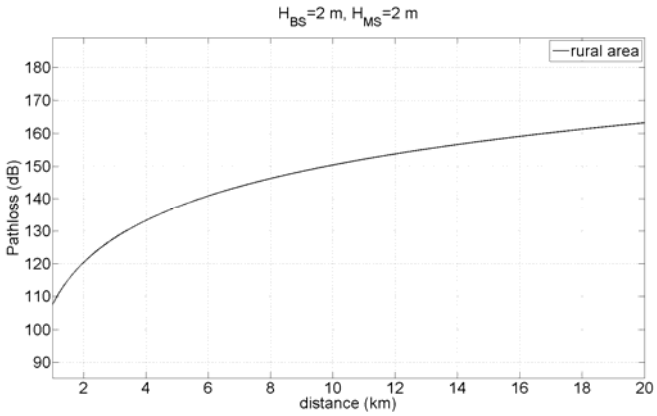


Figure 3 – Pathloss versus distance

Hardware losses include B210 receiver noise figure F = 8 dB (line 8 in table 1). Noise temperature [6] is computed according to T = (F-1)·290 = 1540 K (line 9 in Table II). Noise power spectral density is computed according to $N_0 = k \cdot T$ = -197 dBW/Hz (line 10 in Table II), where k is Boltzmann constant.

Bitrate required for robot control application telemetry transmission is set to R = 1,2 kbps (line 12 in Table 1). It is enough for transmitting a simple movement control commands, e.g. right, left, accelerate, stop.

Operating $(E_b/N_0)_{oper}$ value is defined from P_r/N_0 value according to $(E_b/N_0)_{oper} = P_r/N_0/R$ (line 13 in Table 1).

Communication system feasibility in terms of link margin (line 15 in Table 1) considering $(E_b/N_0)_{req}$ point on the BER curve is defined according to

$$M = EIRP + G_r - (E_b/N_0)_{req} - R - N_0 - L_0$$

Resulting radio link budget margin is positive (line 15 in table 1) which means that designed 433 MHz LPD 2*2 MIMO Alamouti transceiver for a 10 km distance is feasible.

Table 1. Radio link budget calculation

#	Radio link budget parameter	Denotation	Value, dB
1	Transmitter power (dBW)	P_t	-20
2	Tx antenna gain (dBi)	G_t	12
3	EIRP (dBW)	*EIRP*	-8
4	Pathloss (dB)	L_S	150
5	RIP (dBW)	*RIP*	158
6	Rx antenna gain (dBi)	G_r	6
7	Received power (dBW)	P_r	-152
8	Noise figure (dB)	*F*	8
9	Noise temperature (K)	*T* = 1540 K	
10	Noise spectral density (dBW/Hz)	N_0	-197
11	Received P_r/N_0 (dB-Hz)	P_r/N_0	45
12	Bitrate (dB-bit/s)	*R* = 1,2 kbps	31
13	Operating $(E_b/N_0)_{oper}$ (dB)	$(E_b/N_0)_{oper}$	14
14	Required $(E_b/N_0)_{oper}$ (dB)	$(E_b/N_0)_{req}$	10
15	Margin		4

To verify the simulated 2*2 MIMO Alamouti system and evaluate the system architecture we use our laboratory facilities [8]. The laboratory complex consists of two vector signal generators, two spectrum analyzers, channel emulator and SystemVue software.

SystemVue is an electronic design automation environment for electronic system-level design. It works together with measurement equipment. It is possible to upload the simulated signals from software into the vector generator or channel emulator and to play signal on the given radio frequency. The channel emulator has several built-in radio effects: calibrated additive white Gaussian noise (AWGN), fading, multipath and

Doppler. These options give us a unique opportunity to simulate the radio channel and move closer to the real radio channel in highly dynamic changing environment. Therefore algorithms and architecture of the designing device can be tested before first prototype is made. It helps to find bugs in algorithms and optimized parameters on early stages of design process.

The general conception of the performance evaluation of the radio link and system architecture, consist of three steps. Fig. 4 shows realization of this conception.

The first step is modeling the system architecture of the future device in SystemVue software. It provides the simulated signal, which will be very similar to the signal in the real physical device. It is possible to check the performance of algorithms and plot the following characteristic: constellation diagram, BER, eye diagram, impulse response, spectrogram.

The second step include a connection of the SystemVue to the measurement equipment, uploading simulated signal into the generator, and playing it on the radio frequency through a cable or an antenna.

The third step is uploading the simulated files into channel emulator, adding the channel effects: noise, Doppler shift and multipath. All effects are added to the baseband layer.

At the second and third steps the spectrum analyzer with a vector analysis and demodulation features makes the output signal control. Spectrum analyzer records signals to files (VSA-type). These files can be then moved to the SystemVue software for digital signal processing and demodulation, for example, for counting bit error rate.

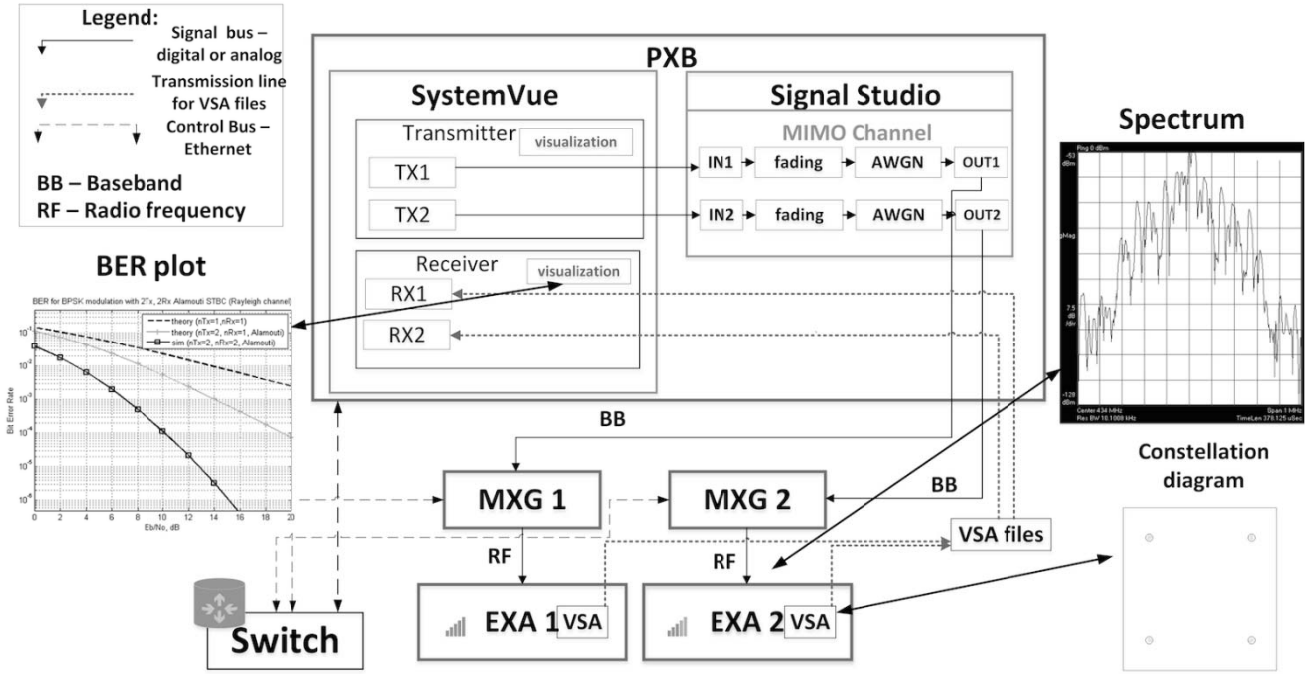


Figure 4 – Test-bed functional diagram

It was essential to spend a few test experiments to create SDR applications development methodology based on B210 and GNU Radio [9, 10]. Choosing between Linux and Windows we decided to use Linux as the host operating system due to full support for Ettus Research USRP devices. We had to check several Linux distributions before one was found that fitted perfectly with B210. Ubuntu 12.04 was chosen because of stable work with combination of GNU Radio and UHD (B210 board).

First, we realized transmitter using standard blocks of GNU radio library that can generate signals with different types of modulation (BPSK, QPSK and FSK). Spectrum analyzer by Agilent technologies was applied to check transmission results in the form of high-resolution constellation diagrams and spectrums. Since, GNU Radio supports UHD, we could control several parameters of zero intermediate frequency tract, such as operational frequency, sample rate, gain, low-pass filter corner frequency, decimation factor and more. To get correct results on the screen of spectrum analyzer, we faced some problems with adapting parameters between GNU Radio and Agilent. For example, scheme of transmitter in GNU radio consists symbol rate parameter and Agilent software has sample rate parameter and matching of these dimensions caused difficulties in getting constellation diagrams.

All in all, hardware experiment consisted of PC with GNU radio transmitter block scheme connected with B210 board by USB cable and Agilent Spectrum analyzer with proper aerial for receiving signal. As a result we have got spectrums (Fig. 6, 7) of BPSK, QPSK and FSK modulations.

In the future work we will program the Xilinx Spartan 6 FPGA to make the MIMO 2x2 Alamouti modulator/demodulator and encoding/decoding scheme. After that we will continue laboratory tests to choose the best modulation and coding scheme. Then we will make a field trials in a rural area.

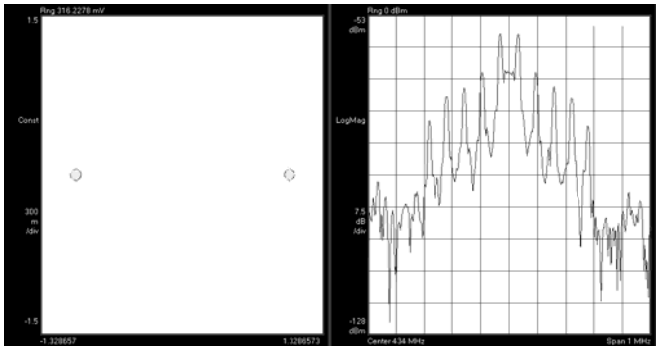


Figure 5 – BPSK Constellation Diagram and Spectrum

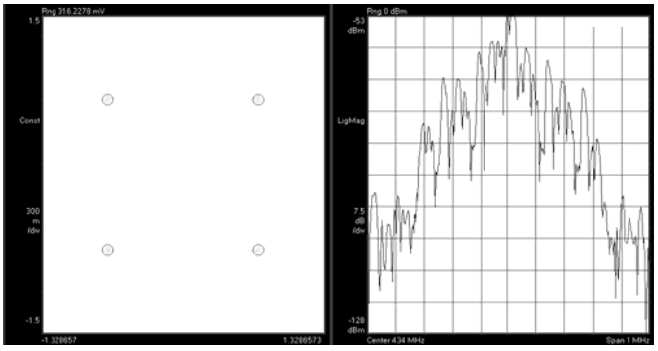


Figure 6 – QPSK Constellation Diagram and Spectrum

The aim of this paper is to show the design process of 433 MHz LPD band transceiver for long-range robot control applications up to 10 km distance.

We suggested 2*2 Alamouti scheme for transceiver. We also computed the radio link budget for given distance. The results show that the communication system is feasible meeting all the requirements of the LPD band (especially low transmit power).

In the paper we proposed high precision Agilent hardware and SystemVue software test bench for performance evaluation of 2*2 MIMO radio link.

We presented USRP B210 hardware development framework for our MIMO 2x2 Alamouti scheme and conducted trial radio link test with BPSK/QPSK demodulation. We used UHD capabilities in conjunction with GNU Radio software on the USRP B210 hardware. We verified the system on the proposed Agilent test bench.

1. ETSI EN 300 220-1 V2.4.1 (2012-01), "Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Radio equipment to be used in the 25 MHz to 1 000 MHz", ETSI, 2012.
2. ERC Recommendation 70-03 relating to the use of Short Range Device (SRD), European Conference of Postal and Telecommunications Administrations, CEPT/ERC 70-03, Troms, Norway, rev. 2014.
3. Alamouti, Siavash. "A simple transmit diversity technique for wireless communications." Selected Areas in Communications, IEEE Journal on 16.8 (1998): 1451-1458.
4. QoS Performance requirements for UMTS. Nortel Networks (2001). http://www.3gpp.org/ftp/tsg_sa/wg1_serv/TSGS1_03-HCourt/Docs/Docs/s1-99362.pdf
5. Recommendation ITU-R P.529-3 (1999-10), "Prediction methods for the terrestrial land mobile service in the VHF and UHF bands",ITU-R,1999
6. Sklar, Bernard. Digital communications. Vol. 2. NJ: Prentice Hall, 2001.
7. Bialkowski, K. S., et al. "2x2 MIMO Testbed for Dual 2.4 GHz/5GHz Band."Electromagnetics in Advanced Applications, 2007. ICEAA 2007. International Conference on. IEEE, 2007.
8. Mashkov G., Borisov E., Fokin G. Experimental validation of multipoint joint processing of range measurements via software-defined radio testbed //2016 18th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT). – IEEE, 2016. – С. 268-273.
9. Фокин, Г.А. Модельно-ориентированное проектирование на основе SDR / Г.А. Фокин, В.А. Лаврухин, Д.А. Волгушев, А.В. Киреев // Системы управления и информационные технологии. 2015. Т. 60. № 2. С. 94-99.
10. Фокин, Г.А. Модельно-ориентированное проектирование систем радиосвязи на основе ПКР / Г.А. Фокин, Д.А. Волгушев, Д.В. Буланов // Вестник связи. 2015. № 6. С. 26-30.

В.А. Лаврухин, Г.А. Фокин

РАЗРАБОТКА LPD-ПРИЕМОПЕРЕДАТЧИКА С ПОДДЕРЖКОЙ MIMO НА ОСНОВЕ ПРОГРАММНО-КОНФИГУРИРУЕМОГО РАДИО В ПРИЛОЖЕНИИ К УПРАВЛЕНИЮ РОБОТОМ

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Россия
lavrukhin@sut.ru

В последние годы во всем мире наблюдается большой рост интереса к системам управления роботами. Одним из наиболее сложных вопросов при реализации таких систем является разработка радиоканала между роботом и пунктом управления. Для увеличения дальности радиоканала многие разработчики используют радиокомпоненты LPD-диапазона, работающего на частотах 433 МГц. Для описанного в данной статье приложения дальность связи должна составить не менее 10 км, что является очень высоким показателем в условиях многолучевости и других канальных эффектов. Предложенное решение использует схему MIMO 2x2 совместно с алгоритмом Аламути, позволяя выиграть по энергетике более 10 дБ по сравнению со схемой SISO. Приведенные расчеты бюджета канала связи показывают, что требуемая дальность связи достижима. Для моделирования системы использована тестовая зона на базе оборудования Agilent и ПО SystemVue. Для прототипирования приемопередатчика применено оборудование SDR компании EttusResearch.

В данной статье приведено описание текущего проекта СПбГУТ по созданию радиоканала для управления роботом. Требуемый канал связи должен быть построен на базе приемопередатчиков с 2x2 MIMO на основе SDR, работать с дальностью до 10 км в нелицензируемом диапазоне 433 МГц (LPD).

Анализ современного рынка приемопередатчиков в диапазоне 433 МГц показал отсутствие решений с применением технологии MIMO 2x2. Большинство существующих решений построены на дискретных компонентах. Однако предлагаемое решение построено на базе программно-конфигурируемого радио (SDR), что позволяет в дальнейшем использовать его в режиме когнитивного радио.

Для реализации проекта выбран 70-см диапазон а районе 433 МГц, доступный для нелицензионного использования устройствами малой мощности (LPD) [1], называемыми также устройствами малого радиуса действия (SRD) [2].

В разработке была использована аппаратная платформа Ettus Research B210 Universal Software Radio Peripheral (USRP), применение которой позволило достичь 10 км радиуса действия при использовании телеметрии для управления роботом. Передача телеметрической информации требует всего нескольких кбит/с для обмена командами управления движением робота должна быть нечувствительна к информационным ошибкам и потерям пакетов [4].

В данной работе показано, что использование техники пространственного разделения с двумя антеннами, построенной на основе алгоритмов пространственно-временного кодирования Аламути (STBC) [3], позволяет выполнить надежную передачу телеметрической информации.

Для тестирования предложенной системы был выполнен ряд программных симуляций коэффициента битовой ошибки (BER) для схемы MIMO 2x2 с применением алгоритмов Аламути. Затем было определено граничное значение Eb/N0 и рассчитан бюджет радиоканала связи. Для проверки работоспособности системы была разработана схема испытаний на базе оборудования и программного обеспечения Agilent, которая позволяет проследить за изменением радиосигнала в режиме реального времени.

В мире насчитывается всего несколько коммерческих MIMO SDR-решений. Большинство представленного оборудования имеет встроенный приемопередатчик MIMO 2x2. Обычно диапазон поддерживаемых частот для таких решений намного превышает установленные для реализации проекта требования. Все представленные решения поддерживают LPD-диапазон 433 МГц и имеют полосу в несколько десятков МГц. Поэтому для реализации проекта была выбрана аппаратная платформа Ettus Research USRP B210, имеющая широкую поддержку и распространение в нашей стране.

USRP B210 имеет 2 цепи приемников и передатчиков. В качестве радиомодуля в ней использован приемопередатчик Analog Devices AD9361 с прямым преобразованием. USRP B210 использует обе цепочки чипа AD9361, что позволяет использовать ее для реализации MIMO 2x2 с помощью аппаратного драйвера USRP Hardware Driver (UHD).

UHD — это драйвер с открытым исходным кодом для Windows, Linux и Mac OS, который обеспечивает общий программируемый интерфейс API для множества программных платформ SDR, например GNU Radio. Обработка сигналов на USRPB210 выполняется с помощью ПЛИС Spartan6 XC6SLX150, подключенного к ПК по интерфейсу USB 3.0.

Известно, что многолучевость представляет собой серьезную проблему в радиосвязи. При больших падениях уровня принимаемого сигнала происходят замирания, которые приводят к высоким значениям коэффициента битовой ошибки (BER). Технология MIMO позволяет значительно улучшить надежность радиоканала, особенно в режиме отсутствия прямой видимости в диапазоне 433 МГц при управлении роботом.

Рассмотрим производительность схему кодирования Аламути MIMO 2x2 с модуляцией ФМ-2 в канале с релеевскими замираниями.

Функциональная схема системы показана на рис.1. Система состоит из передатчика (Tx) и приемника (Rx), каждый из которых включает по 2 антенны. Между Tx и Rx находится радиоканал. Соотношение между Tx и Rx показано в (1)

$$y = \mathbf{H}x + n$$

где **y** — это вектор принятого сигнала, **x** — вектор переданного сигнала, **H** — это комплексная канальная матрица и **n** — вектор шума [7].

Схема Аламути использует пространственно-временной блок с передачей оригинальной пары символов в первом символьном периоде и измененной пары — во втором.

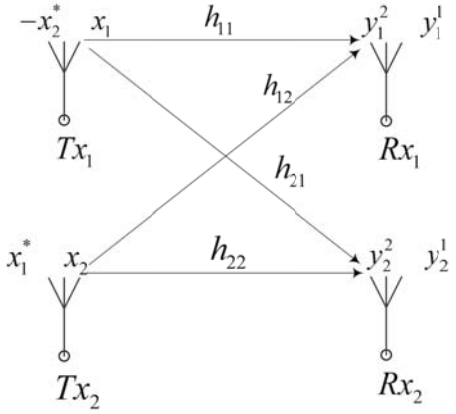


Рисунок 1 – Система MIMO

Два последовательных символа x1 и x2 кодируются с помощью пространственно-временной кодовой матрицы (2) [3]:

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_1 & -x_2^* \\ x_2 & x_1^* \end{bmatrix}$$

Предполагая, что каждый канал приема-передачи независим и испытывает неглубокие замирания, каждый переданный в (1) символ умножается на комплексное случайное число, изменяющееся по закону Релея h_{ij}, и остающееся постоянным в течение обоих символьных периодов (3):

$$\begin{bmatrix} y_1^1 \\ y_2^1 \\ y_1^{2*} \\ y_2^{2*} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \\ h_{12}^* & -h_{11}^* \\ h_{22}^* & -h_{21}^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1^1 \\ n_2^1 \\ n_1^{2*} \\ n_2^{2*} \end{bmatrix}$$

где y_1^1 и y_2^1 — это принятая информация в первом символьном периоде на первой и второй антенне соответственно; y_1^2 и y_2^2 — принятая информация во втором символьном периоде на первой и второй антенне соответственно; h_{ij} — это канал от i^{th} приемной антенны до j^{th}передающей

антенны; n_1^1 и n_2^1 — это шум в первый символьный период на первой и второй антенне соответственно; n_1^2 и n_2^2 — это шум во второй символьный период на первой и второй антенне соответственно.

Анализ разнесения основан на критерии максимального правдоподобия (ML) на стороне приемника. Комплексная ортогональность кода Аламути в (2) позволяет упростить структуру приемника ML.

Для симуляции было использовано ПО Matlab. На рис. 2 показана зависимость отношения Eb/N0 от BER для схемы Аламути MIMO 2x2.

На рис. 2 показано, что BER для двухантенной реализации намного лучше, чем BER для реализации с одной антенной. Для BER=0.0001 требуемое $(E_b/N_0)_{req}$ =10 дБ (сторока14 в табл. 1).

В работе был рассчитан бюджет канала связи (табл. 1). Основной вклад в потери на трассе вносят замирания, рассчитанные по модели Okumura-Hata [5] (см. рис 3). В качестве рабочей точки для сельской местности был выбран уровень Ls = 150 дБ (строка 4 в табл 1), т.к. именно в этих условиях будет использован робот. Показатели аппаратной платформы включают: мощность передатчика USRP B210 P_t = -20 дБВт (10 мВт) (строка 1 в табл. 1), коэффициент усиления антенны Tx G_t = 12 дБи, коэффициент усиления антенны Rx G_r = 6 дБи.

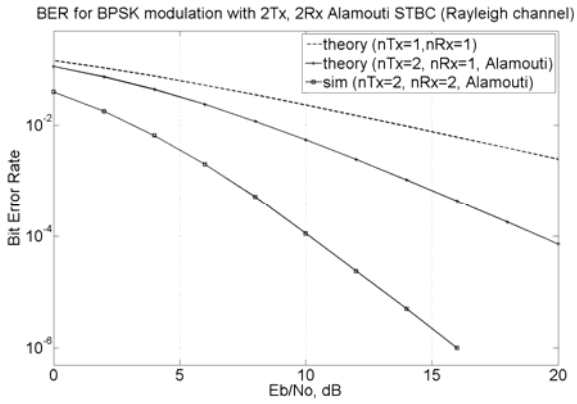


Рисунок 2 – BER для схемы 2x2 MIMO Аламути STBC

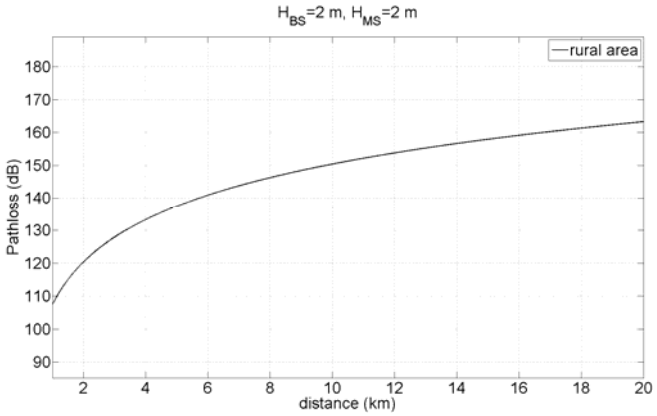


Рисунок 3 – Потери на трасе от расстояния

Потери в аппаратной платформе включают коэффициент шума F = 8 дБ (строка 8 в табл. 1). Шумовая температура [6] рассчитана по формуле T = (F-1)·290 = 1540 K (строка 9 в табл. 1). Спектральная плотность мощности шума рассчитана по формуле $N_0 = k \cdot T$ = -197 дБВт/Гц (строка 10 в табл. 1), где k — постоянная Больцмана. Скорость передачи данных для телеметрического канала управления роботом принята R = 1,2 кбит/с (строка 12 в табл.1). Этого достаточно для передачи простых команд движения роботу. Рабочее значение $(E_b/N_0)_{oper}$ определено из значения P_r/N_0 согласно формуле $(E_b/N_0)_{oper} = P_r/N_0/R$ (строка 13 в табл. 1).

Реализуемость радиоканала в терминах энергетического запаса (строка 15 в табл. 1) в точке $(E_b/N_0)_{req}$ на кривой BER определяется по формуле:

$M = EIRP + G_r - (E_b/N_0)_{req} - R - N_0 - L_0$

Итоговый бюджет радиоканала положителен (строка 15 в табл. 1), что подтверждает реализуемость LPD-приемопередатчика в диапазоне 433 МГц со схемой Аламути MIMO 2x2 и радиусом действия 10 км.

Для проверки смоделированной системы MIMO 2x2 были использованы возможности лаборатории СПбГУТ [8]. Лабораторный комплекс состоит из двух векторных генераторов сигналов, двух анализаторов спектра, эмулятора каналов и ПО SystemVue.

SystemVue — это среда для автоматизации разработки радиооборудования, работающая совместно с измерительным оборудованием Agilent. Система позволяет загрузить эмулированные сигналы в векторный генератор и “проиграть” их в реальный радиоэфир на заданной частоте. Эмулятор каналов имеет встроенные физические имитаторы канальных эффектов: белый шум (AWGN), замирания, многолучевость и доплеровский эффект. Возможности лаборатории позволяют перейти от компьютерных симуляций к более реальному моделированию физических сигналов с учетом канальных эффектов в высокодинамичной среде. Поэтому алгоритмы и архитектура проектируемого устройства может быть отлажена до создания первого прототипа, что позволяет находить ошибки и оптимизировать параметры системы на ранних стадиях разработки.

Таблица 1. Расчет бюджета канала связи

№	Параметр	Обозначение	Значение, дБ
1	Мощность передатчика (дБВт)	P_t	-20
2	Коэффициент усиления Tx (дБи)	G_t	12
3	ЭИИМ (дБВт)	$EIRP$	-8
4	Потери на трассе (дБ)	L_S	150
5	RIP (дБВт)	RIP	158
6	Коэффициент усиления Rx (дБи)	G_r	6
7	Мощность принимаемого сигнала (дБВт)	P_r	-152
8	Коэффициент шума (дБ)	F	8
9	Шумовая температура (К)	T = 1540 K	
10	Спектральная плотность мощности шума (дБВт/Гц)	N_0	-197
11	Приняное P_r/N_0 (дБ-Гц)	P_r/N_0	45
12	Скорость передачи (дБ-бит/с)	R = 1,2 kbps	31
13	Рабочее $(E_b/N_0)_{oper}$ (дБ)	$(E_b/N_0)_{oper}$	14
14	Требуемое $(E_b/N_0)_{oper}$ (дБ)	$(E_b/N_0)_{req}$	10
15	Энергетический запас		4

В основе отладки проектируемого устройства на лабораторном стенде лежат 3 шага (см. рис. 4). Первый шаг — это моделирование архитектуры системы в ПО SystemVue, которое создает сигнал очень близкий к получаемому в реальном устройстве. На этом этапе возможно проверить производительность выбранных алгоритмов и построить графики следующих характеристик: сигнальное созвездие, BER, глазковая диаграмма, спектрограмма.

На втором шаге сигналы из ПО SystemVue загружают в реальное измерительное оборудование, и проигрывают на реальной частоте в радиоканал или кабель.

На третьем шаге к схеме добавляют эмулятор каналов с различными эффектами: шум, доплеровский эффект и многолучевость.

На втором и третьем шаге используют анализатор сигнала с функциями векторного анализа и демодуляции, который записывает полученные сигналы в файлы. В дальнейшем эти файлы могут быть использованы для цифровой обработки и демодуляции, например для расчета BER в ПО SystemVue.

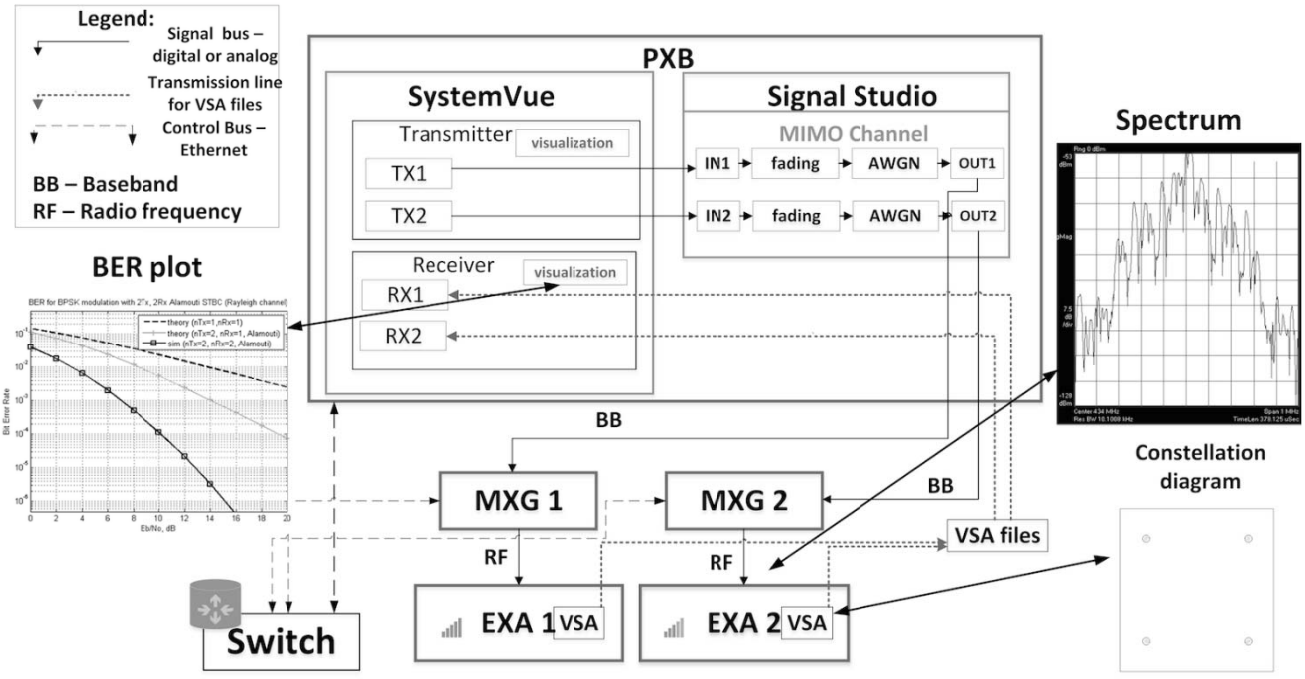


Рисунок 4 – Функциональная схема тестовой зоны

После отладки системы был создан прототип решения на базе аппаратной SDR-платформы USRP B210 и ПО GNU Radio [9, 10]. Система была построена на ОС Linux из-за полной поддержки устройств Ettus Research USRP. В качестве дистрибутива была использована ОС Ubuntu 12.04 благодаря стабильной работе с GNU Radio и UHD.

Вначале был реализован передатчик с помощью стандартных блоков в библиотеке GNU radio (ФМ-2, ФМ-4, ЧМ). Для проверки спектрограмм и сигнальных созвездий был использован спектроанализатор Agilent. Т.к. GNU Radio поддерживает UHD-драйвер, то в схеме возможно изменять частоту, коэффициент усиления, частоту дискретизации и многие другие параметры прямо из ПО.

В итоговую схему испытаний прототипа вошли: ПК с ПО GNU radio, аппаратная платформа USRP B210 и спектроанализатор Agilent. В результате были получены следующие графики (рис. 6, 7) для модуляций ФМ-2 и ФМ-4.

В будущем в проекте планируется использовать ПЛИС Xilinx Spartan 6 FPGA для создания MIMO 2x2 модулятора/демодулятора с помехоустойчивым кодированием/декодированием. Затем лабораторные испытания будут продолжены для выбора наилучшей схемы модуляции/кодирования. В дальнейшем будут проведены испытания в сельской местности.

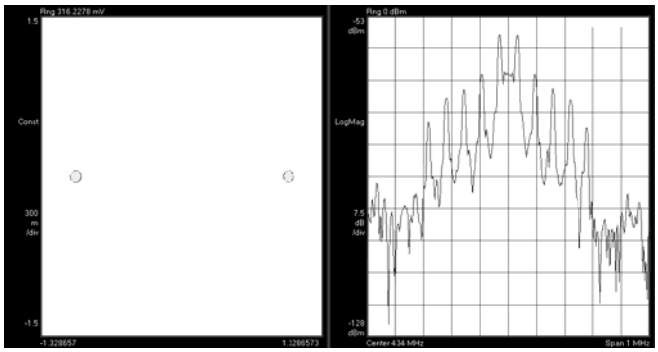


Рисунок 5 – Сигнальное созвездие и спектрограмма ФМ-2

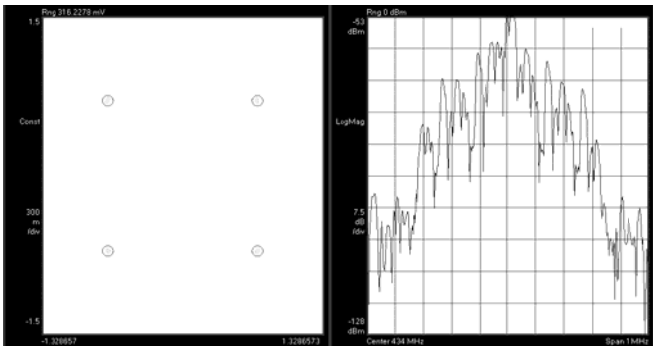


Рисунок 6 – Сигнальное созвездие и спектрограмма ФМ-4

Целью данной работы было показать процесс разработки LPD-приемопередатчика для управления роботом на расстоянии 10 км. Для его реализации в работе предложена схема MIMO 2x2 Аламути, рассчитан бюджет радиоканала. Результаты моделирования и испытаний показывают, что предложенная система реализуема.

1. ETSI EN 300 220-1 V2.4.1 (2012-01), "Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Radio equipment to be used in the 25 MHz to 1 000 MHz", ETSI, 2012.
2. ERC Recommendation 70-03 relating to the use of Short Range Device (SRD), European Conference of Postal and Telecommunications Administrations, CEPT/ERC 70-03, Troms, Norway, rev. 2014.
3. Alamouti, Siavash. "A simple transmit diversity technique for wireless communications." Selected Areas in Communications, IEEE Journal on 16.8 (1998): 1451-1458.
4. QoS Performance requirements for UMTS. Nortel Networks (2001). http://www.3gpp.org/ftp/tsg_sa/wg1_serv/TSGS1_03-HCourt/Docs/Docs/s1-99362.pdf
5. Recommendation ITU-R P.529-3 (1999-10), "Prediction methods for the terrestrial land mobile service in the VHF and UHF bands",ITU-R,1999
6. Sklar, Bernard. Digital communications. Vol. 2. NJ: Prentice Hall, 2001.
7. Bialkowski, K. S., et al. "2x2 MIMO Testbed for Dual 2.4 GHz/5GHz Band."Electromagnetics in Advanced Applications, 2007. ICEAA 2007. International Conference on. IEEE, 2007.
8. Mashkov G., Borisov E., Fokin G. Experimental validation of multipoint joint processing of range measurements via software-defined radio testbed //2016 18th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT). – IEEE, 2016. – С. 268-273.
9. Фокин, Г.А. Модельно-ориентированное проектирование на основе SDR / Г.А. Фокин, В.А. Лаврухин, Д.А. Волгушев, А.В. Киреев // Системы управления и информационные технологии. 2015. Т. 60. № 2. С. 94-99.
10. Фокин, Г.А. Модельно-ориентированное проектирование систем радиосвязи на основе ПКР / Г.А. Фокин, Д.А. Волгушев, Д.В. Буланов // Вестник связи. 2015. № 6. С. 26-30

B. Leskov, E. Seliverstova

CALCULATION OF FORCES OF CONTACT INTERACTION BETWEEN DEFORMABLE OBJECT AND FINGERS OF ROBOTIC GRIPPER

Dmitrov branch of BMSTU, Dmitrov
c8.df.mgtu@gmail.com

Abstract

The question of simulation of contact interaction between deformable object and fingers of robotic gripper is considered. The method of determination of contact surfaces and calculation of contact forces is offered. Comparing of results of operation of algorithm with the experimental data is given.

Keywords: grasp, deformable object, contact surface, forces of contact interaction.

А.Г. Лесков, Е.В. Селиверстова

РАСЧЕТ СИЛ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МЕЖДУ ДЕФОРМИРУЕМЫМ ОБЪЕКТОМ И ЗВЕНЬЯМИ ЗАХВАТНОГО УСТРОЙСТВА МАНИПУЛЯТОРА

ДФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Дмитров
c8.df.mgtu@gmail.com

Аннотация

Рассмотрен вопрос моделирования контактного взаимодействия между деформируемым объектом и звеньями захватного устройства. Предложен способ определения поверхностей контакта и расчета контактных сил. Приведено сравнение результатов работы алгоритма с экспериментальными данными.

Ключевые слова: захват, деформируемый объект, поверхность контакта, силы контактного взаимодействия.

Введение

В настоящее время прослеживается устойчивая тенденция перехода к роботизированным технологиям в различных областях деятельности человека. Робототехнические системы предоставляют возможность выполнить манипуляционную задачу с объектом без непосредственного нахождения человека в операционной зоне. Наиболее распространенной манипуляционной операцией является захват объекта.

Одним из способов синтеза захвата является офлайн планирование по геометрическим моделям захватного устройства манипулятора (ЗУМ) и объекта манипулирования (ОМ) [1], выполняющее предварительную оценку возможных способов захвата. Для каждого способа конфигурации ЗУМ рассчитываются силы контактного взаимодействия (СКВ) между звеньями ЗУМ и ОМ, при обеспечении которых выполнение операции будет успешным. В случае планирования захвата хрупкого ОМ или ОМ, значительная деформация которого не допускается, к точности расчета СКВ предъявляются высокие требования. Вопросу определения величин и направлений контактных сил и посвящена данная работа.

При планировании и моделировании захвата широкое распространение получили модели твердого тела (МТТ) ([1]). Это связано с простотой описания состояния объекта. Однако МТТ применимы только в случаях, когда контакт между звеном ЗУМ и ОМ можно рассматривать как точечный, поскольку предположение о твердости сводит контактную задачу для объектов произвольной формы к единственному решению. Это приводит к значительному увеличению модуля СКВ, полученного в результате синтеза, по сравнению с величиной реальной контактной силы ввиду того, что модуль распределенной силы меньше сосредоточенной. Кроме того, контакт между объектами вызывает появление напряжений, которые в свою очередь приводят к деформации в виде изменения формы контактирующих поверхностей, а значит и к изменениям направлений нормалей поверхностей, вдоль которых рассчитываются нормальные составляющие СКВ. Поэтому рассчитанная в результате синтеза захвата с использованием МТТ контактная сила будет отличаться от реальной и по направлению.

Перечисленные причины позволяют предположить, что использование моделей деформируемых тел (МДТ) ([2], [3]) является решением обозначенной проблемы. Однако использование МДТ увеличивает время вычислений, поскольку на каждом шаге моделирования расчет состояний производится для каждого дискретного элемента модели, даже когда тело не претерпевает существенной деформации.

Альтернативой приведенным ранее является описанная в [4] модель – модель квазитвердого тела (МКТТ), объединяющая преимущества МТТ для динамического моделирования и преимущества МДТ для решения задач определения контактных поверхностей и расчета СКВ. МКТТ применима для объектов, поверхность которых подвергается небольшим деформациям в области контакта, в то время как объект в целом сохраняет свою изначальную форму. Поэтому, МКТТ может использоваться при планировании захвата хрупкого ОМ или ОМ, значительная деформация которых не допускается.

Определение контактных поверхностей

Моделирование захвата осуществляется путем пошагового изменения положения элементов ЗУМ для перевода его в состояние «схват закрыт». На некотором шаге поверхности ОМ и звена ЗУМ начинают пересекаться. Пересечение является условным и в действительности отсутствует. Для устранения такого пересечения необходимо решить задачу, которая заключается в определении локальной деформации объекта и звена, как если бы они прикоснулись без пересечения.

Поверхности ОМ и звена ЗУМ представлены в виде матриц $P'=[p'_1,\ldots,p'_N]^T$ и $Q'=[q'_1,\ldots,q'_M]^T$, строки которых содержат координаты вершин полигональных моделей ОМ и звена ЗУМ соответственно. Вначале осуществляется проверка на наличие пересечения между объектом и звеном [5]. Если пересечение обнаружено, выполняется расчет его параметров [5] (рисунок 1). Первым параметром является область пересечения, которая представляет собой фигуру, образованную в результате конъюнкции фигур ЗУМ и ОМ. Она задается двумя матрицами $P=[p_1,\ldots,p_n]^T$ и $Q=[q_1,\ldots,q_m]^T$, строки которых являются координатами вершинполигональных моделей объекта и звена, потенциально испытывающих смещение из-за деформации. Вторым параметром является глубина проникновения ЗУМ в ОМ при захвате, т.е. минимальное расстояние, на которое нужно развести эти объекты, чтобы их поверхности перестали пересекаться. Третьим параметром – вектор, вдоль которого отсчитывается глубина проникновения.Последние два параметра задаются двумя матрицами глубин проникновений $\delta_P=[\delta_{p1},\ldots,\delta_{pn}]^T$ и $\delta_Q=[\delta_{q1},\ldots,\delta_{qm}]^T$, составленных из векторов, нормы которых равны глубинам проникновений для вершин из матриц Pи Q. Векторы $\delta_{pi}(i=1,2,\ldots n)$ сонаправлены, а векторы $\delta_{qj}(j=1,2,\ldots m)$ противоположно направлены с вектором движения звена ЗУМ относительно объекта v на текущем шаге моделирования (рисунок 1).

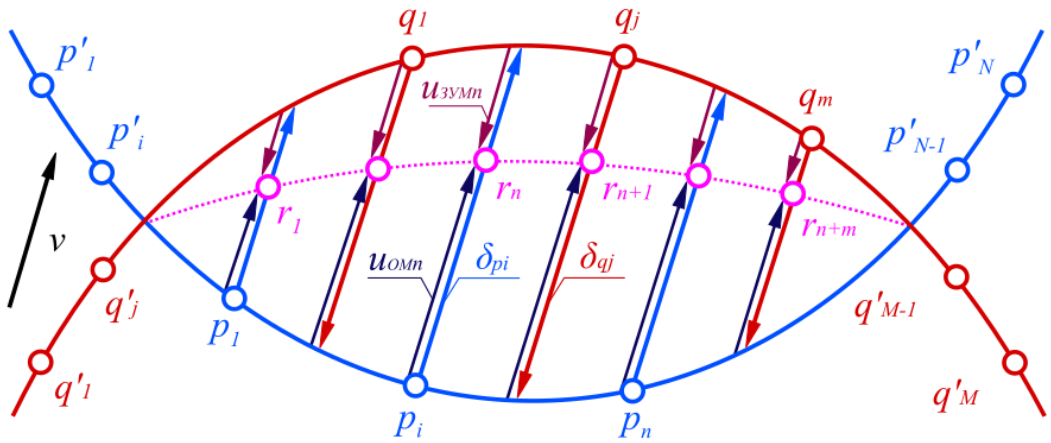


Рисунок 1 –Определение контактной поверхности

Полагаем, что строки матриц вершин пятна контакта ОМ $R_P=[r_{p1},\ldots,r_{pn}]^T$ и пятна контакта звена ЗУМ$R_Q=[r_{q1},\ldots,r_{qm}]^T$формируются из координат, полученных путем смещения вершин $p_i(i=1,2,\ldots n)$ и $q_j(j=1,2,\ldots m)$ вдоль соответствующих векторов проникновений $\delta_{pi}(i=1,2,\ldots n)$ и $\delta_{qj}(j=1,2,\ldots m)$:

$$R_P = P + \delta_P \cdot \frac{D_{ЗУМ}}{D_{ЗУМ} + D_{ОМ}},\ R_Q = Q + \delta_Q \cdot \frac{D_{ОМ}}{D_{ЗУМ} + D_{ОМ}},$$

где $D_{ОМ}$ и $D_{ЗУМ}$ – коэффициенты Гука объекта и звена соответственно.

В процессе захвата звено ЗУМ вступает в контакт с ОМ, в результате которого формируется пара пятен контакта, принадлежащих поверхностям ОМ и ЗУМ. Поскольку эти пятна имеют одинаковую форму, для каждой вершины из R_P и R_Q существуют точки на поверхностях звена и объекта, с которыми они находится в контакте. Поэтому далее рассматриваем пару пятен контакта как единую контактную поверхность, заданную матрицей вершин $R=[\ [R_P]^T,\ [R_Q]^T]^T=[r_1,\ldots,r_n,r_{n+1},\ldots,r_{n+m}]^T$(рисунок 1).

Найдем функцию, описывающую контактную поверхность. Для вершин, содержащихся в строках матрицы R,решаем задачу интерполирования сплайн-поверхностью [6], то есть восстанавливаем функцию $\varphi(r_x,r_y)\approx r_z$, основанную на данных интерполяции $r_{ix},r_{iy},r_{iz},i=1,2...n+m$. Для этого необходимо решить систему линейных алгебраических уравнений:

$$\varphi(r_x,r_y)=\sum_{i=1}^{n+m}C_i\cdot[(r_x-r_{ix})^2+(r_y-r_{iy})^2]\cdot\ln[(r_x-r_{ix})^2+(r_y-r_{iy})^2]+A\cdot r_x+B\cdot r_y+D,$$

$$\sum_{i=1}^{n+m}C_i=0,\ \sum_{i=1}^{n+m}C_i\cdot x_i=0,\ \sum_{i=1}^{n+m}C_i\cdot y_i=0,\ \varphi(r_{xi},r_{yi})=r_{zi},\ i=1,2,...,n+m.$$

Введем в рассмотрение матрицу смещений вершин ОМ u_{OM}=[$[R_P–P]^T$, $[R_Q–Q–\delta_Q]^T]^T$= $[u_{OM\ 1},\ldots,u_{OM\ n},u_{OMn+1},\ldots,u_{OMn+m}]^T$и матрицу смещений вершин звена ЗУМ $u_{ЗУМ}$=[$[R_P–P–\delta_P]^T$, $[R_Q–Q]^T$ $]^T$=$[u_{ЗУМ\ 1},\ldots,u_{ЗУМ\ n},u_{ЗУМn+1},\ldots,u_{ЗУМn+m}]^T$(рисунок 1).

Матрице вершин R соответствуют матрицы нормальных u_{OMN} и касательных $u_{OM\tau}$ смещений вершин ОМ, а также нормальных $u_{ЗУМN}$ и касательных $u_{ЗУМ\tau}$ смещений вершин звена ЗУМ (рисунок 2). Ввиду того, при захвате поверхности ОМ и звена ЗУМ деформируются, изменяются и направления нормалей этих поверхностей. Поэтому строки матриц смещений:

$$u_{OM\ Ni}=u_{OM\ i}\cdot n_{OM\ i}\cdot n_{ri},\qquad u_{OM\tau i}=q_{OMi}\cdot(u_{OMi}-u_{OMi}\cdot n_{OMi}\cdot n_{OMi})\cdot q_{OMi}^{-1},$$

$$u_{ЗУМ\ Ni}=u_{ЗУМ\ i}\cdot n_{ЗУМ\ i}\cdot n_{ri},\ u_{ЗУМ\tau i}=q_{ЗУМi}\cdot(u_{ЗУМi}-u_{ЗУМi}\cdot n_{ЗУМi}\cdot n_{ЗУМi})\cdot q_{OMi}^{-1},$$

где n_{OMi}, $n_{ЗУМi}$, n_{ri} – единичные векторы нормалей поверхностей объекта, звена и контактной поверхности в соответствующих точках, q_{OMi} и $q_{ЗУМi}$ – кватернионы такие, что

$$q_{OM\ i}=\{\cos[\arccos(n_{OM\ i}\cdot n_{ri})/2],n_{OM\ i}\times n_{ri}\cdot\cos[\arccos(n_{OM\ i}\cdot n_{ri})/2]\},$$

$$q_{ЗУМ\ i}=\{\cos[\arccos(n_{ЗУМ\ i}\cdot n_{ri})/2],n_{ЗУМ\ i}\times n_{ri}\cdot\cos[\arccos(n_{ЗУМ\ i}\cdot n_{ri})/2]\}.$$

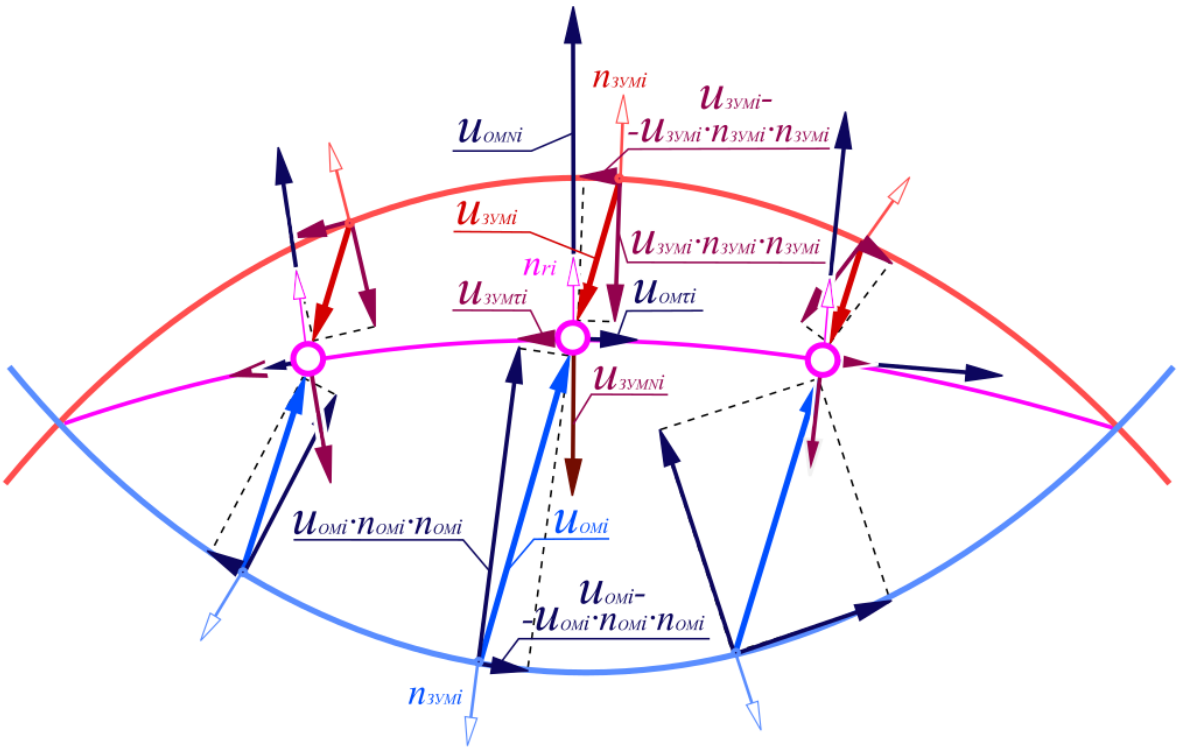


Рисунок 2 –Определение смещений вершин ОМ и звена ЗУМ

Расчет сил контактного взаимодействия

Представим распределенную СКВ, с которой звено ЗУМ действует на ОМ, в виде матрицы, строки которой являются векторами сосредоточенных сил F_{OM}=$[f_{OM1},\ldots,f_{OMn+m}]^T$, приложенными к вершинам, содержащимся в матрице R. Справедливо равенство: F_{OM}= F_{OMN}+ F_{OMTP}, где F_{OMN}= $[f_{OMN1},\ldots,f_{OMNn+m}]^T$ – матрица, строки которой есть векторы нормальных сил, с которыми звено ЗУМ действует на ОМ, F_{OMTP} = $[f_{OMTP1},\ldots f_{OMTPn+m}]^T$ – матрица, строки которой представляют собой векторы сил трения, с которыми звено ЗУМ действует на ОМ. Аналогично можно представить распределенную

СКВ, с которой ОМ действует на звено ЗУМ: $F_{ЗУМ}=[f_{ЗУМ1},\ldots,f_{ЗУМn+m}]^T = F_{ЗУМN} + F_{ЗУМTP}$, где $F_{ЗУМN}=[f_{ЗУМN1},\ldots,f_{ЗУМNn+m}]^T$ и $F_{ЗУМTP}=[f_{ЗУМTP1},\ldots,f_{ЗУМTPn+m}]^T$.

Для нахождения матриц сил F_{OMN},F_{OMTP}, $F_{ЗУМN}$и$F_{ЗУМTP}$ необходимо решить задачутеории упругости, которая заключается в определении сил по известным перемещениям точек тела, т.е. нужно найти отношение между матрицами смещений u_{OMN}, $u_{ЗУМN}$$u_{OMTP}$, $u_{ЗУМTP}$ и матрицами сил F_{OMN},F_{OMTP}, $F_{ЗУМN}$,$F_{ЗУМTP}$.

Поскольку рассматриваются малые деформации, физическая модель может быть основана на теории линейной упругости. В дальнейшем будем рассматривать контактное взаимодействие в рамках аппроксимации полупространства [7].

Поскольку предполагается линейная упругость материала, векторы нормального смещения u_{Nj} и касательного смещения $u_{\tau j}$ для точки r_j, вызванные множествами векторов сосредоточенных нормальных сил $F_N=[f_{N1},\ldots,f_{Nm}]^T$ и касательных сил $F_\tau=[f_{\tau 1},\ldots,f_{\tau n}]^T$, могут быть найдены как суперпозиция векторов смещений:

$$u_{Nj}=\frac{1-\nu}{2\cdot\pi\cdot G}\cdot\sum_{k=1,k\neq j}^{m}\frac{f_{Nk}}{l_k}+\frac{f_{Nj}}{D},\ u_{\tau j}=\frac{1-\nu}{2\cdot\pi\cdot G}\cdot\sum_{k=1,k\neq j}^{n}\frac{f_{\tau k}}{l_k}+\frac{f_{\tau j}}{D},$$

где ν – коэффициент Пуассона, G – модуль сдвига, l_k– расстояние между вершиной r_jи r_k, к которой приложена нормальная точечная сила f_{Nk}, f_{Nj} – нормальная точечная сила, приложенная к вершине r_j, D– коэффициент Гука.

После обобщения для всех точек контактной поверхности связь между F_{OMN}, $F_{ЗУМN}$,F_{OMTP} , $F_{ЗУМTP}$ и u_{OMN}, $u_{ЗУМN}$, $u_{OM\tau}$, $u_{ЗУМ\tau}$ может быть выражена в матричной форме:

$$u_{OMN}=W_{OM}\cdot F_{OMN},\quad (1)$$

$$u_{ЗУМN}=W_{ЗУМ}\cdot F_{ЗУМN},\quad (2)$$

$$u_{OM\tau}=W_{OM}\cdot F_{OMTP},\quad (3)$$

$$u_{ЗУМ\tau}=W_{ЗУМ}\cdot F_{ЗУМTP},\quad (4)$$

где W_{OM}и $W_{ЗУМ}$ – передаточные матрицы ОМ и звена ЗУМ размера $[n+m$x$n+m]$, элементы которых вычисляются по формулам:

$$w_{OMii}=\frac{1}{D_{OM}},\ w_{OMij}=\frac{1-\nu_{OM}}{2\cdot\pi\cdot G_{OM}\cdot l_j},\ w_{ЗУМii}=\frac{1}{D_{ЗУМ}},\ w_{ЗУМij}=\frac{1-\nu_{ЗУМ}}{2\cdot\pi\cdot G_{ЗУМ}\cdot l_j},$$

где D_{OM}, $D_{ЗУМ}$ – коэффициенты Гука объекта и ЗУМ,ν_{OM} и $\nu_{ЗУМ}$ – коэффициенты Пуассона ОМ и звена, G_{OM} и $G_{ЗУМ}$ – модули сдвига объекта и ЗУМ, l_j– расстояние между вершинами r_iи r_j.

Расстояние l_j между вершинами r_iи r_jопределяется из соотношения:

$$l_j=\sum_{k=1}^{m-1}\sqrt{x_\Delta{}^2+y_\Delta{}^2+[\varphi(r_{ix}+(k+1)\cdot x_\Delta,r_{iy}+(k+1)\cdot y_\Delta)-\varphi(r_{ix}+x_\Delta\cdot k,r_{iy}+y_\Delta\cdot k)]^2},\ x_\Delta=\frac{r_{jx}-r_{ix}}{m},$$

$$y_\Delta=\frac{r_{jx}-r_{ix}}{m},$$

где φ – восстановленная функция контактной поверхности, m – количество шагов расчета, x_Δ и y_Δ – величина шага по координатам x и y соответственно.

Вычитание (2) из (1) и (4) из (3) дает:

$$u_{OMN}-u_{ЗУМN}=W_{OM}\cdot F_{OMN}-W_{ЗУМ}\cdot F_{ЗУМN},$$

$$u_{OM\tau}-u_{ЗУМ\tau}=W_{OM}\cdot F_{OMTP}-W_{ЗУМ}\cdot F_{ЗУМTP}.$$

Ввиду того, что эпюры сил, действующих на ОМ и ЗУМ, зеркально симметричны относительно поверхности пятна контакта, справедливы равенства $F_{OMN}=-F_{ЗУМN}=F_N$и $F_{OMTP}=-F_{ЗУМTP}=F_{TP}$. Можно записать соотношения:

$$u_{OMN}-u_{ЗУМN}=(W_{OM}+W_{ЗУМ})\cdot F_N\Leftrightarrow F_N=(W_{OM}+W_{ЗУМ})^T\cdot(u_{OMN}-u_{ЗУМN}),$$

$$u_{OM\tau}-u_{ЗУМ\tau}=(W_{OM}+W_{ЗУМ})\cdot F_{TP}\Leftrightarrow F_{TP}=(W_{OM}+W_{ЗУМ})^T\cdot(u_{OM\tau}-u_{ЗУМ\tau}).$$

Откуда матрицы нормальных сил F_{OMN}, $F_{ЗУМN}$и матрицы сил трения F_{OMTP}, $F_{ЗУМTP}$:

$$F_{OMN}=(W_{OM}+W_{ЗУМ})^T\cdot(u_{OMN}-u_{ЗУМN}),\ F_{ЗУМN}=-(W_{OM}+W_{ЗУМ})^T\cdot(u_{OMN}-u_{ЗУМN}),$$

$$F_{OMTP} = (W_{OM} + W_{ЗУМ})^T \cdot (u_{OM\tau} - u_{ЗУМ\tau}),\ F_{ЗУМTP} = -(W_{OM} + W_{ЗУМ})^T \cdot (u_{OM\tau} - u_{ЗУМ\tau}).$$

Тогда матрицы сил контактного взаимодействия F_{OM} и $F_{ЗУМ}$:

$$f_{OM\,i} = f_{OM\,Ni} + f_{OM\,TPi},\ f_{ЗУМ\,i} = f_{ЗУМ\,Ni} + f_{ЗУМ\,TPi},\ i = 1,...,n+m.$$

Программная реализация

Представленные алгоритмы расчета контактных поверхностей и СКВ реализованы на функционально-моделирующем стенде Дмитровского Филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана [8].

Аппаратная часть состоит из захватных устройств SchunkWSG50 и SchunkSDH. Программная часть реализована с использованием мета-операционной системы ROS [9]. Результаты расчета СКВ и показания датчиков силы пальцев схвата SchunkWSG50 представлены на рисунке 3.

На рисунке 3 а изображен способ захвата ОМ захватным устройством SchunkWSG50. На рисунке 3 е представлен графики зависимостей показаний датчика положения (пунктир) и показаний датчика силы пальца (сплошная линия) от времени. В соответствии с зафиксированным положением пальцев и ОМ в программе была воссоздана конфигурация захвата (рисунок 3 б). На рисунке 3 б точками указаны вершины контактной поверхности. На рисунках 3 в и 3 г стрелками изображены нормальные и касательные составляющие СКВ соответственно, на рисунке 3 д – СКВ, соответствующие вершинам контактной поверхности. В соответствии с алгоритмом расчета, модуль СКВ составил 13,8 Н, что на 2,9 Н отличается от значения, зафиксированного датчиком силы.

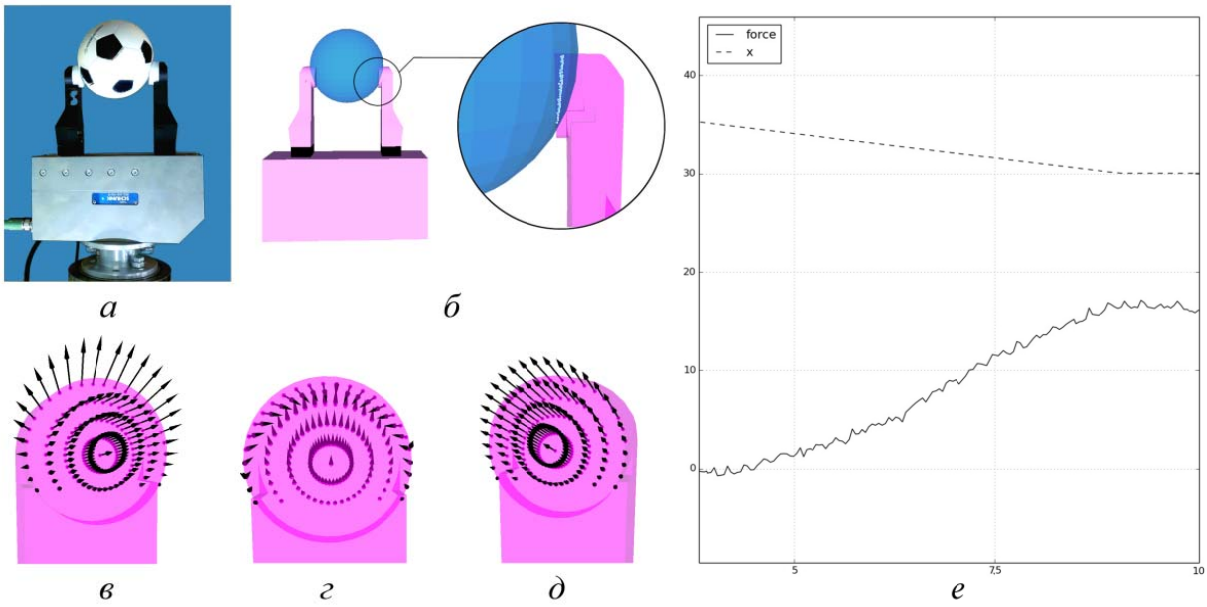


Рисунок 3 –Показания датчиков силы и положения пальца схвата и результаты расчета СКВ

Заключение

Разработанные алгоритмы и программное обеспечение позволяют производить оценку СКВ между ОМ и звеном ЗУМ с точностью порядка 15-20%. В дальнейшем планируется развитие алгоритма в сторону оценки успешности захвата с учетом сил тяжести ОМ и расположения контактных поверхностей.

1. Лесков А.Г., Илларионов В.В., Калеватых И.А., Морошкин С.Д., Бажинова К.В., Феоктистова Е.В. Аппаратно-программный комплекс для решения задач автоматического захвата объекта манипуляторами // Инженерный журнал: наука и инновации. 2015. вып. 1. URL: http://engjournal.ru/catalog/pribor/robot/1361.html (Дата обращения: 15.05.2016).
2. Jeong I.K., Lee I. An oriented particles and generalized spring model for fast prototyping deformable objects // Eurographics 2004. Short Presentations. – 2004. – P. 41–44.
3. Tan S., Wong T., Zhao Y., Chen W. A constrained finite element method for modeling cloth deformation. // The Visual Computer. – 1999. Vol.15 (2). – P.90–99.
4. Pauly M., Pai D.K., Guibas L.,J. Quasi-rigid objects in contact // In Proc. SCA '04 Proceedings of the 2004 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation. – 2004. – P. 109–119.
5. Лесков А.Г., Феоктистова Е.В. Алгоритм определения пересечения произвольных полигональных моделей для нахождения коллектора контакта, нормалей и глубины проникновения при

планировании и моделировании захвата деформируемого объекта // Сборник докладов VIII всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «БУДУЩЕЕ МАШИНОСТРОЕНИЯ РОССИИ» – 2015. – С. 988-992.
6. Ашкеназы В.О. Сплайн-поверхности. Основы теории и вычислительные алгоритмы. – Тверь: Тверской гос. ун-т, 2003. – 82 с.
7. Попов В. Л. Механика контактного взаимодействия и физика трения. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013. – 352 с.
8. http://fms.bmstu.ru/
9. http://wiki.ros.org/

M. Arkhipov, V. Golovin, E. Vzhesnevski

RESEARCH OF OPERATING MODES OF SERVICE MANIPULATION ROBOT INTERACTING WITH A DEFORMABLE ELASTIC MEDIUM

Moscow Polytechnic University, Moscow
medicalrobot@mail.ru

Abstract

In this paper the automation of massage as one of the most effective restorative medicine techniques is considered. The general problems of this robotics are connected with the features of noninvasive interaction of robot with viscous-elastic soft tissues. The method of the most natural training by showing of necessary trajectory taking into account the deforming of soft tissues and then the reproduction of recorded date is proposed. The method of force points training with program input of assigned forces is special case of spatial training by showing with manual input of assigned forces. For experimental investigations the method of imitation of patient's mobility while breathing is considered.

Keywords: robotics, restorative medicine, human - machine system, massage, preserving medicine, soft tissues, showing training, reproduction, compliant control.

М.В. Архипов, В.Ф. Головин, Е.А. Вжесневский

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СЕРВИСНОГО МАНИПУЛЯЦИОННОГО РОБОТА ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩЕГО С ДЕФОРМИРУЕМОЙ УПРУГОЙ СРЕДОЙ

Московский политехнический университет
medicalrobot@mail.ru

Аннотация

В данной статье рассматривается автоматизация массажа как одна из наиболее эффективных техник восстановительной медицины. Основная проблема данной робототехники связана с особенностями неинвазивного взаимодействия робота с вязко-упругими мягкими тканями. Предложен метод наиболее естественного обучения путём демонстрации необходимой траектории при деформировании мягких тканей и затем воспроизведения записанных данных. Метод силовых обученных точек с программным вводом заданных сил является частным случаем пространственного обучения путём демонстрации с мануальным вводом заданных усилий. Рассматривается метод имитации подвижности пациента при дыхании.

Ключевые слова: робототехника, восстановительная медицина, человеко-машинные системы, массаж, мягкие ткани, обучение показом, воспроизведение, податливое управление.

В настоящее время существуют мобильные роботы и роботы-кресла для выполнения механотерапевтических воздействий на пациента [1], однако наиболее эффективными являются манипуляционные роботы, актуаторы которых выполняют движения аналогичные рукам врача.

Поэтому, концепция разработки и внедрения адаптивных и интеллектуальных манипуляционных роботов для улучшения здоровья людей и повышения их работоспособности в массовом масштабе является актуальной.

С точки зрения механики задача массажа состоит в деформировании определённых участков мягкой ткани (МТ) – механорецепторов кожных, мышечных, сухожильных. Также при массаже деформируются сосуды, кровеносные и лимфатические, вызывая дренажный эффект, хотя основной

эффект массажа рефлекторный. Известны исследования свойств МТ [2], связанные с диагностикой опухолей в МТ и исследования [3], связанные с разработкой хирургических копирующих манипуляторов. Однако задачи распознавания опухолей и хирургические манипуляции на МТ отличаются от задач управляемого неинвазивного деформирования МТ.

Разработанные основы теории силового взаимодействия и управления в контактных задачах предполагают контактные взаимодействия, в основном, с твёрдыми телами небиологической природы, в то время как объекты управления систем в ВМ – биологические мягкие ткани (МТ), имеющие ряд особенностей как вязкоупругие тела с нелинейными характеристиками и изменяющимися свойствами [4].

Необходимость учёта силового взаимодействия робота с мягкими тканями приводит к идее обучения робота траекториям, которые отражают заданное движение X_0 и усилия F_0, причём к самой естественной форме обучения – показу необходимого движения [5]. Система обучения показом является человеко-машинной системой, в которой усилия задаются не программно базой знаний, а чувствительной и опытной рукой массажиста. Это не видеопоказ, а повторение роботом силовых ощущений массажиста. Схема режимов выполнения роботом массажа с обучением показом и учётом деформирования мягких тканей представлена на рис. 1. Первой фазой управления является обучение показом.

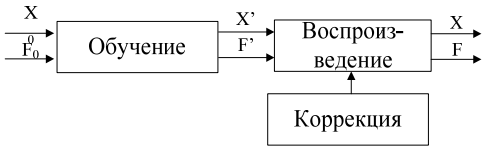


Рисунок 1 – Схема режимов выполнения роботом массажа

Метод обучения показом с учётом деформирования мягких тканей существенно отличается от известного неконтактного метода обучения непрерывным геометрическим траекториям, например применяемого в окраске распылением, или неконтактного метода обучения отдельным узловым точкам с пульта ручного управления. Функциональная схема робота при обучении движения показом с учётом деформирования среды [5] представлена на рис. 2. Цель управления этой системы – усилие взаимодействия инструмента массажиста-оператора с мягкими тканями пациента должно приближаться к усилию, развиваемому оператором на рукоятке, к которой крепится инструмент $F \rightarrow F_0$.

Так как массажист-оператор деформирует мягкие ткани пациента не непосредственно своей рукой, а инструментом, необходимо определённое обучение массажиста ощущать мягкие ткани через инструмент.

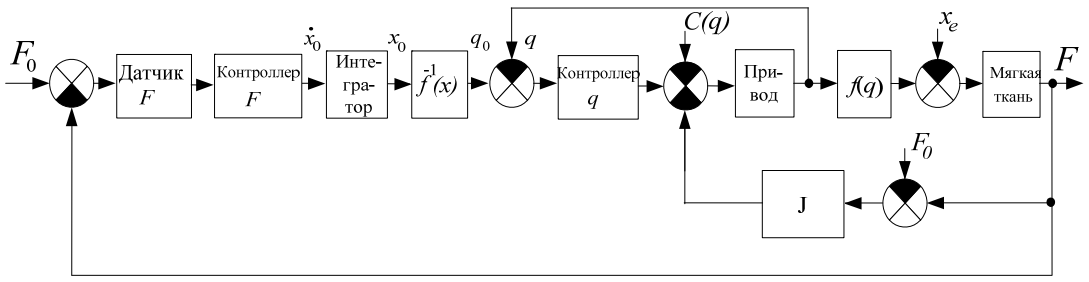


Рисунок 2 – Схема системы обучения демонстрацией показом с учетом деформирования МТ

Частным случаем системы контактного обучения показом является система обучения силовых точек, содержащих только одну силовую компоненту F_z, измеряемую однокомпонентным датчиком усилия вдоль инструментальной оси робота, направляемой перпендикулярно к поверхности МТ [6].

Действительно, $\{A_i;F_z\} = \{(x, y, z, o, a, t, F_z)^T\}$ представляет собой множество силовых точек и Fz_0задается программным способом.

В случае обучения показом обученная непрерывная траектория содержит силовые точки, включающие все шесть силовых компонент, измеренных 6-ти компонентным датчиком усилия.

$\{A_i; F\} = \{(x, y, z, o, a, t, F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z)^T\}$ множество точек, обучаемых показом, причём F_0 – задаётся аппаратно. Таким образом, имеем $A^{Fz} \subset A^F$.

Большинство экспериментальных исследований было проведено [7] для робота, оснащённого системой обучения силовых точек, что в определённой степени относится к системам обучаемых мануальным показом.

Вторая фаза управления – воспроизведение введённых в робот заданных значений движений и

усилий с использованием позиционно-силового управления (ПСУ). Наиболее простой является система позиционного воспроизведения, осуществляющая отслеживание обученной или интерполированной траектории (рис. 3). Заданные усилия F_0 переносятся обученными силовыми точками или обученной показом силовой непрерывной траекторией $X = f(X_0, F_0)$ [5]. Реальные усилия не измеряются. Позиционные приводы робота имеют высокую жёсткость.

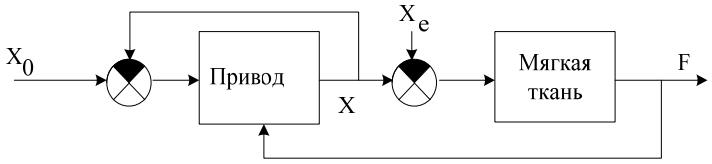


Рисунок 3 – Функциональная схема жёсткого позиционного робота, взаимодействующего с мягкими тканями

Если программное обеспечение робота предполагает расчёт перемещения робота после опроса датчика усилия, то при ограниченном быстродействии приводов возможна только низкая скорость перемещений робота при мелком шаге, что необходимо для обеспечения точности (рис. 4).

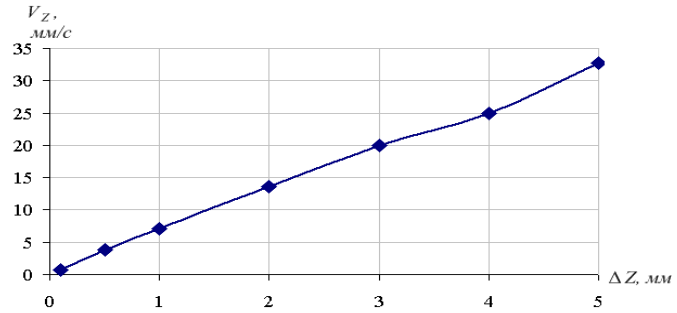


Рисунок 4 – Зависимость скорости перемещений робота от шага

Параллельное ПСУ предполагает независимое управление по перемещениям робота вдоль заданной траектории X_0 и заданным усилиям F_0. Это управление необходимо, чтобы корректировать задаваемое усилие на силовой траектории и корректировать небольшие смещения МТ, например, при дыхании пациента. При аппаратном решении параллельного ПСУ ряд приводов, например шесть приводов ангулярного робота, отслеживают обученную позиционную траекторию, а отдельный, например седьмой силовой линейный привод, закреплённый на фланце шестого звена, отслеживает заданное вдоль инструментальной оси усилие F_{0z} (рис. 5).

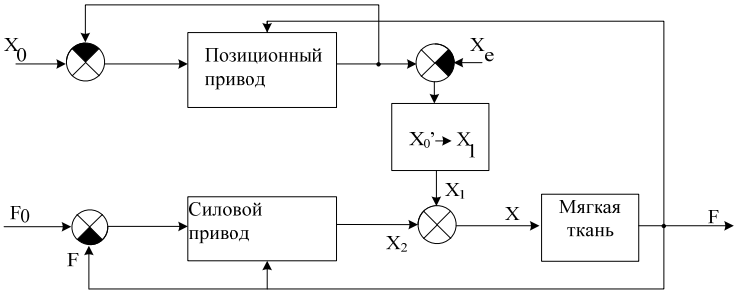


Рисунок 5 – Блок-схема системы параллельного ПСУ

Перемещение инструмента робота, обеспечивающее необходимое деформирование МТ, складывается из перемещений позиционных приводов x_1 и перемещения силового привода x_2.

Особенности РТС для ВМ как человеко-машинных систем

Особенностью медицинских человеко-машинных систем является взаимодействие робота и оператора с третьей компонентой человеком-пациентом [8]. Учёт третьей компоненты позволяет создать системы совместного управления при одновременной работе робота и массажиста-оператора и систему, в которой робот как массажное кресло управляется пациентом.

Для реализации эргатической РТС на основе серийно выпускаемых роботов как аппаратно добавляемые применялись биомехатронные модули со следующими функциями: измерение усилий для ПСУ, предохранение от перегрузок, регулирование податливости, измерение тонуса мышц для БТУ,

смены инструмента. На рис. 6. представлен один из биомехатронных модулей робота с пружинным компенсатором и однокомпонентным датчиком усилия [7].

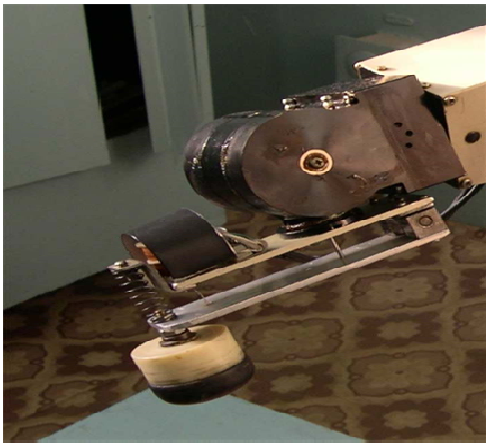


Рисунок 6 – Биомехатронный модуль с однокомпонентным индукционным силовым датчиком

Большинство экспериментальных работ было проведено с участием модернизированного робота РМ-01, оснащённого однокомпонентным силовым датчиком, позволяющим обучение узловых силовых точек [4]. Чтобы учитывать подвижность пациента при его дыхании был разработан метод с использованием двух взаимодействующих роботов (рис. 7) [9]. Первый робот выполнял позиционную функцию $z_0'(t) \approx A\sin 2\pi f$. Второй обеспечивал заданное усилие с силовой ошибкой $\varepsilon_F(f) = (F\text{-}F_0)/F_0$.

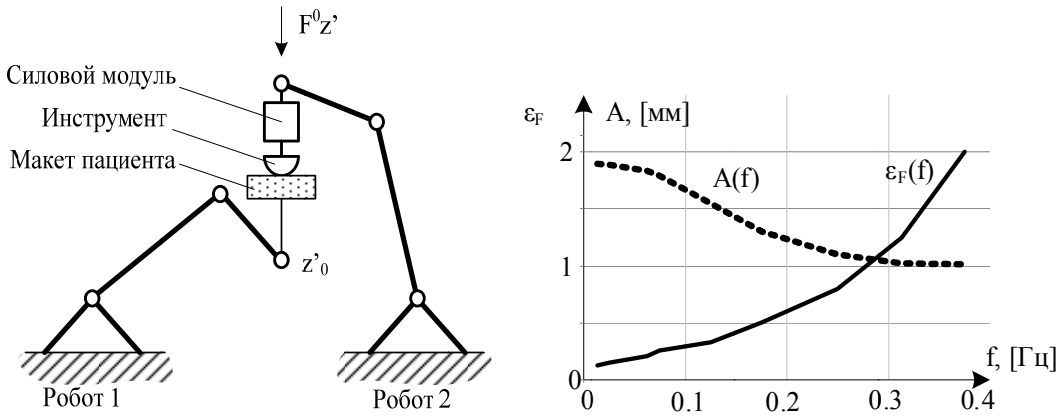


Рисунок 7 – Имитация дыхания пациента

Заделы, полученные в исследованиях, позволяют предложить три варианта проектов РТС для ВМ: РТС с однокомпонентным датчиком усилия и позиционным воспроизведением; РТС с шестикомпонентным датчиком усилия, обучением показом и позиционным воспроизведением; РТС с шестикомпонентным датчиком усилия, обучением показом и силовым воспроизведением.

Приоритет идеологии разработки универсальных медицинских роботов для ВМ принадлежит России. Существует патент на способ и устройство для выполнения массажа с применением манипуляционного робота [10].

Развитие работ в области ВМ может учитывать достижения робототехники в хирургии, где инвазивные действия: разрезы, проколы, выполняются с высочайшей точностью.

Заключение

Существующие заделы исследований позволяют в настоящее время разработку робототехники для профилактической восстановительной медицины с организацией обучения показом и воспроизведением обученной траектории. Будущие исследования предполагают разработку робототехники для выполнения более тонких приёмов массажа для травмированных пациентов, с последствиями ДЦП, инсульта.

Объединение усилий разработчиков, производителей медицинской техники и лечебно-профилактических учреждений здравоохранения в интегрированные научно-производственные структуры в форме кластеров позволит расширить области применения массажной робототехники,

как на стационарном, санаторно-курортном, так и амбулаторном этапах профилактической медицины и реабилитации.

Благодарности

Научная работа, описанная в этой статье была поддержана грантом Президента Российской Федерации № МК-5826.2016.8и ЦТПО Университета машиностроения «МАМИ»

1. Головин В.Ф., Саморуков А.Е. Способ массажа и устройство для его осуществления: Патент на изобретение № 2145833, 1998.
2. Sadovnichi, V., Goryacheva, I. et al.: Application of mechanics methods of contact interaction in the diagnosis of pathological states of soft biological tissues, MSU, Moscow (2009)
3. Tavakoli, M., Patel, R., Moallem, M., Aziminejad, A.: Haptics for teleoperated surgical robotic systems. . Monograph series in the World scientific publishing under the title «New frontiers in robotics», WSPC, Singapore (2003)
4. Головин В.Ф., Архипов М.В., Павловский В.Е. Особенности проектирования робототехнических систем для восстановительной медицины // Мехатроника, автоматизация, управление. 2015. № 10. Том 16. С. 664–671.
5. Golovin, V., Zhuravlev, V., Arkhipov M.: Robotics in Restorative Medicine. LAP LAMBERT Academic Publishing, GmbH & Co. KG (2012)
6. Golovin, V., Arkhipov, M., Legotin, S., Kocherevskaya, L.: Expansion of ergonomics function in medical robotics. New Trends in Medical and Service Robots, Proceedings of Third International Workshop on Medical and Service Robots, Springer. pp. 207-218 (2015)
7. Golovin, V., Zhuravlev, V., Arkhipov, M.: Position/force control of medical robot interacting with dynamic biological soft tissue, Advances on Theory and Practice of Robots and Manipulators, Proceedings of Romansy 2014 XX CISM-IFToMM. pp. 95-107. Springer, Switzerland (2014)
8. Razumov, A., Gavrusin, S., Gercik, Y., Makarova, M. and Gercik, G.: Biomechanical and clinical aspects of medical robotic systems / REMEDIUM. Journal about Russian market of medicines and medical equipment. № 11, pp. 46-49 (2015)
9. Физиология дыхания [Электронный ресурс]. URL: http://medvuz.com/noz/ch10.php(дата обращения: 10.06.2016).
10. Golovin, V., Zhuravlev, V, Arkhipov, M.: Force training and control of medical robot for massage, New Trends in Medical and Service Robots, Volume 20 of the series Mechanisms and Machine Science. Springer. pp. 95-107 (2014)

V.N. Kazmin, V.P. Noskov

FORMATION OF GEOMETRIC AND SEMANTIC MODELS OF ENVIRONMENT IN MOTION CONTROL PROBLEMS

Bauman Moscow State Technical University
slvk@list.ru, noskov_mstu@mail.ru

Abstract

The main solutions of autonomic robotic technology in regard of coordinate detection and creation of environmental model which based on selection of geometric and semantic objects in range-finding imaging received by onboard technical vision system (TVS) during movement in urban and industrial areas have been discussed and proposed. The relevance of creation and use of autonomic robotic complexes for various goals in such environments due to the limitations of using traditional navigation and remote control was substantiated. To solve assigned tasks the efficient algorithms that take into account the initial linear structure of upcoming TVS data. Results of created algorithms, software and hardware, providing the transition from large volumes of original video data to compact geometric and semantic descriptions of the environment which contained explicit navigation data were exposed. These results allow us effectively solve the tasks of autonomous movement control of mobile robotic and unmanned aerial devices.

Keywords: Autonomous mobile robot, technical vision system, geometric and semantic environmental reconstruction, navigation, motion control.

В.Н. Казьмин, В.П. Носков

ФОРМИРОВАНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ И СЕМАНТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ВНЕШНИХ СРЕД В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ*

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва
slvk@list.ru, noskov_mstu@mail.ru

Аннотация

Предложены и рассмотрены решения центральных для автономной робототехники задач определения координат и построения модели окружающего пространства, основанные на выделении геометрических и семантических объектов в дальнометрических изображениях, получаемых бортовой СТЗ в процессе движения в условиях индустриально-городской среды. Обоснована актуальность создания и использования автономных робототехнических комплексов различного назначения для таких сред, обусловленная ограничениями использования традиционных средств навигации и дистанционного управления. Для решения поставленных задач предложены эффективные алгоритмы, учитывающие линейную структурированность исходных данных СТЗ. Приведены результаты работы созданных алгоритмов и программно-аппаратных средств, обеспечивающих переход от больших объемов исходной видеоинформации к компактным геометрическим и семантическим описаниям внешней среды, содержащим в явном виде навигационные данные, что позволяет эффективно решать задачи автономного управления движением мобильных роботов и беспилотных летательных аппаратов.

Ключевые слова: автономный мобильный робот, система технического зрения, геометрическая и семантическая реконструкция внешней среды, навигация, управление движением.

Доля операций и мероприятий, проводимых в индустриально-городской среде и в зданиях, с привлечением роботизированных средств достаточно велика и по оценкам экспертов наблюдается устойчивая тенденция ее роста [1]. Здесь более востребованы автономные мобильные робототехнические комплексы и беспилотные летательные аппараты, т.к. использование в данных условиях систем дистанционного управления ограничено, а во многих случаях и невозможно, вследствие экранирования канала связи. Центральными задачами при создании автономных систем управления являются задачи навигации и реконструкции окружающего пространства [2]. Для рассматриваемых сред характерно экранирование и искажение искусственных (спутниковая навигация) и естественных (магнитное поле Земли) навигационных полей, поэтому перспективными здесь являются методы экстремальной навигации, основанные на обработке дальнометрических изображений, получаемых в процессе движения [3], тем более, что для реконструкция окружающего пространства используются эти же данные [4, 5].

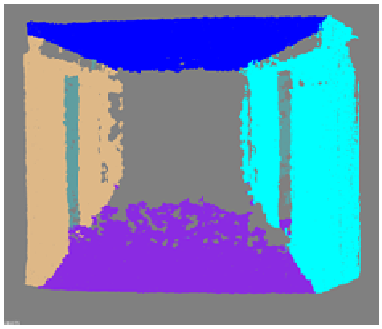
Использование непосредственно исходных облаков точек требует значительных вычислительных ресурсов и памяти. Поэтому актуальной становится задача сжатия исходной информации. Одним из перспективных путей сжатия исходных дальнометрических изображений искусственных сред является представление их в виде совокупности геометрических примитивов (плоскостей, линий, углов). По сравнению с исходным изображением такие линейные объекты характеризуются значительно меньшей размерностью и зашумленностью, а также возможностью нахождения различных отношений между ними и перехода к семантическому описанию окружающего пространства. Например, вместо координат множества точек, попавших на одну плоскость достаточно запомнить уравнение этой плоскости, ее границы и семантическое описание (“стена”, “пол”, “потолок”, “ступенька”, …). Такой подход значительно снижает объем хранимой информации и позволяет более эффективно решать задачи класса SLAM. Кроме того, семантическое описание («понимание») внешней среды позволяет не только более успешно решать задачи автономного движения, но и дает возможность реализации «поведенческого» уровня управления.

Продемонстрируем на реальном примере процесс выделения линейных объектов и на их основе реконструкцию внешней среды и определение координат сенсора (робота). На рис. 1 приведены исходное изображение (а), выделенные подмножества точек (б) и сами плоскости (П) с реперными отрезками (Л) и точками (Т). Совокупность выделенных линейных объектов уже представляет собой реконструкцию (объемную модель) внешней среды. Если известны (например, из предыстории) семантические признаки выделенных объектов (П1 – потолок; П2 – пол; П0, П3, П4 – вертикальные стены), то плоскость пола П2, представленная линейным уравнением плоскости в нормальном виде, позволяет сразу определить координату Z сенсора по свободному члену и углы крена и дифферента по направляющим косинусам,

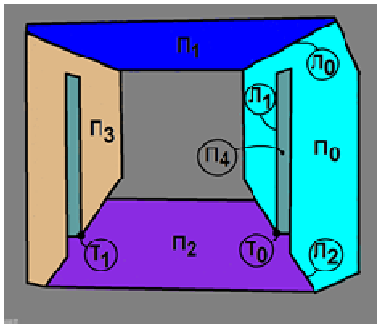
*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-29-04178 офи_м

плоскость стены П0 при известных уже крене и дифференте – курс относительно этой стены. Приведенный пример обработки дальнометрического изображения реальной сцены наглядно демонстрирует переход от исходного облака точек, требующего для хранения больших объемов памяти, к компактному семантическому описанию, содержащему в явном виде информацию о координатах сенсора и объекта управления.

а) видео изображение сцены



б) выделенные подмножества точек



г) выделенные линейные объекты

Рисунок 1 –Процесс формирования геометрической и семантической моделей внешней среды

Обработку получаемой в процессе движения сенсора (робота) последовательности дальнометрических изображений для решения поставленных выше задач можно разделить на четыре основных этапа:

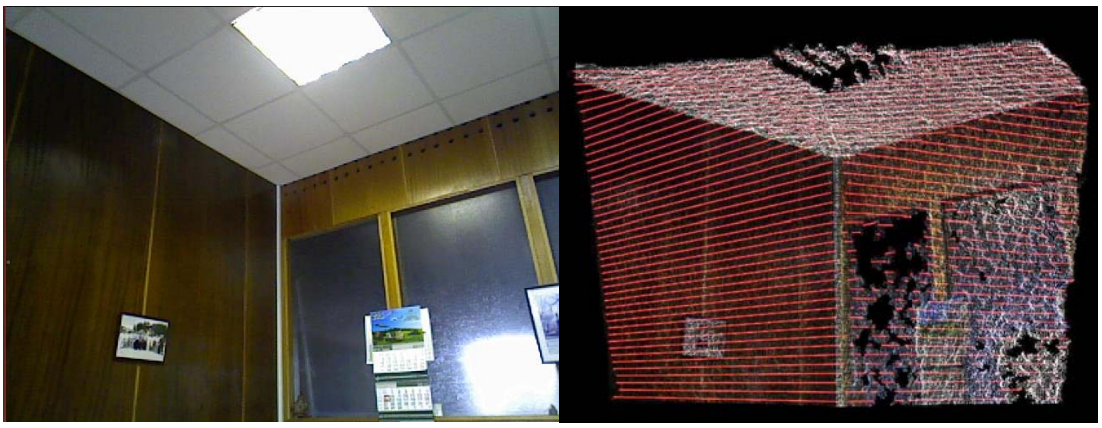
1) в новом изображении (кадре) выделяются линейные объекты и определяются их параметры;

2) для каждого выделенного объекта определятся соответствующий ему парный из имеющейся базы данных;

3) вычисляется перемещение сенсора по параметрам определенных на предыдущем этапе пар линейных объектов;

4) обновляются и уточняются база данных и модель внешней среды по параметрам новых выделенных объектов с учетом найденного на предыдущем этапе перемещения.

Для не структурированных (не упорядоченных) данных для выделения плоскостей можно применять устойчивые к шумам, но требующие больших вычислительных ресурсов, алгоритмы типа RANSAC [6]. Структурированность данных облегчает и ускоряет процесс выделения плоскостей. Например, для каждой точки можно вычислять локальные нормали, а затем, используя методы сегментации, выделять плоскости, объединяя соседние точки с близкими нормалями [7, 8]. Линейная структурированность исходных дальнометрических изображений позволяет предложить эффективные алгоритмы выделения линейных объектов, основанные на поиске подмножеств точек, принадлежащих линиям-отрезкам, лежащих в плоскостях сканирования (рис. 2), с последующим поиском подмножеств линий-отрезков, принадлежащих одной плоскости [9]. Результатом этапа выделения плоскостей в дальнометрическом изображении является список из найденных плоскостей, представленных уравнениями в векторной форме в локальной системе координат, связанной с сенсором



а) б)

Рисунок 2 – Выделение плоскостей на фрагменте, изображённом на фото (а), методом анализа расположения прямых линий (б)

На следующем этапе для каждой из плоскостей, найденных в текущем изображении, в базе данных, представленной в неподвижной системе координат, на основе информации о предположительно совершённом движении ищется соответствующая ей парная плоскость. Парная плоскость может быть найдена в некоторой окрестности обобщенного вектора, соответствующего предположительно совершённому движению (смещение и повороты), варьированием его параметров. В результате получается список из N пар плоскостей, соответствующих друг другу в подвижной и в неподвижной системах координат. Для N пар соответствующих друг другу плоскостей можно записать переопределенную в общем случае систему из 3N нелинейных уравнений с шестью неизвестными (три линейных смещения и три поворота), решение которой является искомым перемещением. Обобщенный вектор наилучшим образом удовлетворяющий данной системе уравнений может быть найдены методами оптимизации, например, итеративным методом Левенберга-Марквардта. В качестве начального приближения могут быть использованы данные, полученные от бортовых инерциальных навигационных датчиков и систем. При небольших перемещениях в качестве начального приближения может быть использован нулевой вектор. Найденное решение может быть улучшено путем исключения “плохих" (плохо соответствующих для найденного решения) пар плоскостей и повторному решению системы нелинейных уравнений для оставшихся пар плоскостей.

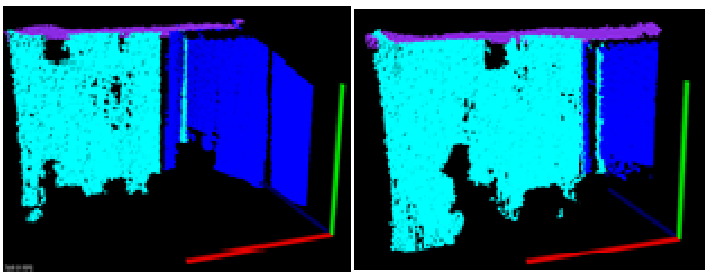
После определения истинного перемещения становится возможным обновление и уточнение базы данных и модели внешней среды по параметрам новых выделенных объектов. Новые плоскости просто вносятся в базу данных, существующие же – уточняются путём усреднения с учётом новых данных, что снижает влияние шумов данных сенсора.

Описанные выше методы и алгоритмы реализованы в виде прикладных программ и опробованы в реальных условиях с реальными сенсорами. На рисунке 3 а) и б) представлены дальнометрические изображения внешней среды, полученные из двух различных положений сенсора (на обоих изображениях облака точек, соответствующие найденным одноименным плоскостям, одинаково расцвечены). Уравнения соответствующих друг другу плоскостей, выделенных в 1-м и во 2-м изображениях, приведены в таблице.

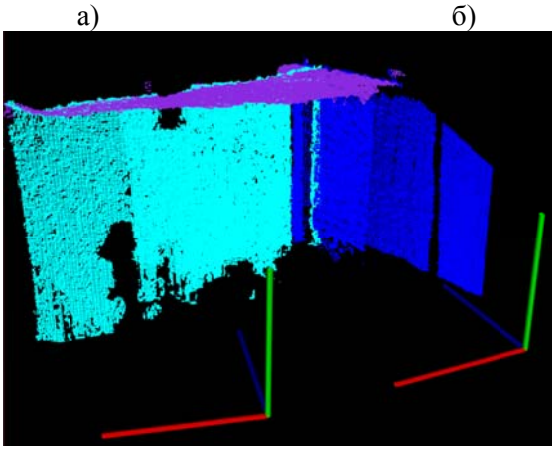
Таблица 1. Таблица выделенных плоскостей

	Уравнения в 1-й системе координат	Уравнения во 2-й системе координат
	0.265x + 0.029y + 0.964z - 4.04 = 0	0.407x + 0.000y + 0.914z - 3.48 = 0
	0.000x + 0.993y+ 0.117z - 1.46 = 0	0.002x + 0.993y + 0.119z - 1.47 = 0
	-0.993x -0.028y+ 0.137 - 0.99 = 0	-0.942x + 0.026y + 0.336z - 2.82 = 0

На рисунке 3 в) показана реконструкция (объединенная модель) внешней среды и вычисленные положения сенсоров.



а) б)



в)

Рисунок 3 – Результат работы созданного прикладного программного обеспечения

Полученные результаты теоретических и экспериментальных исследований позволяют сделать заключение, что предлагаемый подход обеспечивает переход от больших объемов исходной информации, поступающей от дальнометрических СТЗ, к компактным геометрическим и семантическим описаниям внешней среды, которые в явном виде содержат навигационные данные. Это позволяет эффективно решать задачи автономного управления движением мобильных роботов и беспилотных летательных аппаратов в индустриально-городской среде и зданиях.

1. Лапшов В.С., Носков В.П., Рубцов И.В., Рудианов Н.А., Рябов А.В., Хрущев В.С. Бой в городе. Боевые и обеспечивающие роботы в условиях урбанизированной территории. // Таганрог: из-во Технологического ин-та Южного федерального университета, ж. «Известия ЮФУ. Технические науки» №3, 2011. С. 142-146.
2. Каляев А.В., Чернухин Ю.В., Носков В.П., Каляев И.А. Однородные управляющие структуры адаптивных роботов. // М.: Наука, 1990. 147с.
3. Носков В.П., Носков А.В. Навигация мобильных роботов по дальнометрическим изображениям. // М.: «Новые технологии», ж. «Мехатроника, автоматизация, управление» №12, 2005. с. 16-21.
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.
5. Загоруйко С.Н., Казьмин В.Н., Носков В.П. Навигация БПЛА и 3D-реконструкция внешней среды по данным бортовой СТЗ. // М.: «Новые технологии», ж. «Мехатроника, автоматизация, управление» №8, 2014. с. 62-68.
6. M.A. Fischler, R.C. Bolles. Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography // Communications of the ACM, 24(6):381–395, 1981.
7. Holz D., Holzer S., Rusu R. B., Behnke S. Real-Time Plane Segmentation using RGB-D Cameras // In Proceedings of the 15th RoboCup International Symposium, Istanbul, July 2011.
8. Comaniciu D., Meer P. Mean Shift: A Robust Approach Toward Feature Space Analysis // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence - PAMI , vol. 24, no. 5, pp. 603-619, 2002.
9. Казьмин В.Н., Носков В.П. Выделение геометрических и семантических объектов в дальнометрических изображениях для навигации роботов и реконструкции внешней среды. // Таганрог: из-во Технологического ин-та Южного федерального университета, ж. «Известия ЮФУ. Технические науки», №10 (171), 2015 (Тематический сборник «Проблемы управления и робототехники»), С. 71-83.

M.B. Ignatyev, J.A. Lipinskiy, A.A. Litovkin

GRAVITATIONAL TRACTOR SIMULATION FOR ASTEROID HAZARD FIGHTING

Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation
ignatmb@mail.ru

Abstract

In a lecture examined physical and mathematical model of gravity tractor and results over of design are brought. Gravity tractor control problem requires high reliability of the computer system, producing the parameters of orbit of gravity tractor.

Key words: robot, gravity tractor, asteroid hazard, reliability, sensors, computing system.

М.Б. Игнатьев, Я.А. Липинский, А.А. Литовкин

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГРАВИТАЦИОННОГО ТЯГАЧА ДЛЯ БОРЬБЫ С АСТЕРОИДНОЙ ОПАСНОСТЬЮ

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения
ignatmb@mail.ru

Аннотация

В докладе рассматриваются физическая и математическая модель гравитационного тягача и приводятся результаты моделирования. Проблема управления гравитационным тягачем требует высокой надежности вычислительной системы, вырабатывающей параметры орбиты гравитационного тягача.

Ключевые слова: робот, гравитационный тягач, астероидная опасность, надежность, вычислительные системы, датчики.

В последние годы активно рассматриваются различные аспекты так называемой «кометно-астероидной опасности». Научный интерес в астрономии к этой проблеме был всегда, поскольку в ее основе лежат фундаментальные задачи изучения происхождения, строения и эволюции Солнечной системы и населяющих ее небесных объектов (больших и малых планет, их спутников, комет, астероидов и пр.). С другой стороны, астрономические наблюдения последних лет показывают, что заселенность межпланетного пространства, в том числе и околоземного, природными небесными телами типа астероидов, комет и их фрагментов достаточно высока, чтобы представлять реальными их столкновения с Землей.

В настоящее время известно около 400 астероидов диаметрами от нескольких метров до 40 км, орбиты которых опасно сближаются с орбитой Земли (АСЗ – астероид, сближающийся с Землей). Общее же число неоткрытых АСЗ может достичь, по некоторым оценкам, 100 тысяч и более. Встреча Земли с одним из таких АСЗ может иметь катастрофические последствия различной степени. Наиболее тяжелые, глобальные и региональные катастрофы ожидаются от столкновения с АСЗ крупных и средних размеров – от 100 м до десятков километров и более.

С большой достоверностью точечный процесс появления потенциально опасных событий (потенциально опасных сближений Земли с астероидами) является пуассоновским с постоянной интенсивностью. Пуассоновский процесс характеризуется экспоненциальным распределением времени между последовательными скачками (точками экстремального процесса). От катастрофы до катастрофы реализуется случайное число потенциально опасных событий (И.А. Соколов и др.).

Обсуждаемая в печати стратегия астероидной защиты Земли носит пока отвлеченный характер. Основной акцент делается на сбор информации о характеристиках наиболее опасных АСЗ диметрами более 1 км путем организации мониторинга в целях их обнаружения, отождествления и прогнозирования движения. В рамках Международной программы астероидной опасности (Spaceguard Foundation) более 40 астрономических телескопов ведут регулярные наблюдения по обнаружению и отождествлению малых тел Солнечной системы, в том числе и АСЗ. Малоразмерные астероиды, составляющие главную реальную угрозу при их падении на Землю, более многочисленны и менее изучены. Здесь, учитывая большую вероятность их столкновения с Землей, наряду с мониторингом основное значение имеет предотвращение столкновения путем отклонения или уничтожения АСЗ. В ряде работ обсуждаются вопросы создания систем защиты от астероидной опасности различного назначения, структуры, местоположения.

Развитие цивилизации на нашей планете позволяет поставить вопрос о предотвращении космических угроз. Существуют различные проекты для достижения этой цели, в частности, по борьбе с астероидной опасностью. Один из таких проектов – гравитационный тягач (рис. 1). Идея его заключается в том, чтобы изменить траекторию движения астероида путем длительного гравитационного воздействия космического корабля, который должен находиться рядом с астероидом и тем самым изменять характеристики движения астероида.

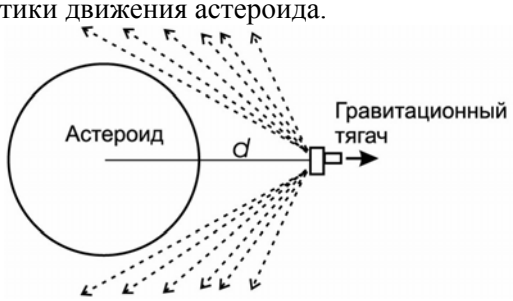


Рисунок 1 – Гравитационный тягач для борьбы с астероидной опасностью

Для иллюстрации проекта создан макет гравитационного тягача (М.Б.Игнатьев, Я.А.Липинский, А.А. Литовкин. Патент на полезную модель №149014, Бюллетень изобретений №12, 2014). Макет (рис. 2) состоит из системы взаимодействующих тел, лазерного дальномера, блока управления, двигателя и солнечной батареи. В макете гравитационные воздействия моделируются магнитными взаимодействиями стального шара (модель астероида) и сильных постоянных магнитов на подвижном основании. Шар перемещается по круговому желобу. Принцип действия макета заключается в том, что с помощью лазерного дальномера измеряется расстояние от подвижного основания, где установлены постоянные магниты, до шара. С помощью блока управления и двигателя это расстояние удерживается

с точностью 1 мм в диапазоне 20–40 мм, тем самым имитируется перемещение астероида под воздействием дополнительной гравитационной силы космического аппарата.

Макет служит для лучшего понимания действия гравитационного тягача и может быть использован в образовательных целях.

Как показывают исследования, с большим астероидом диаметром свыше 10 км человечество на данном уровне развития цивилизации справиться не сможет, и тогда большой катастрофы планетарного масштаба не избежать. Поэтому важны теоретические исследования по разработке новой картины мира.

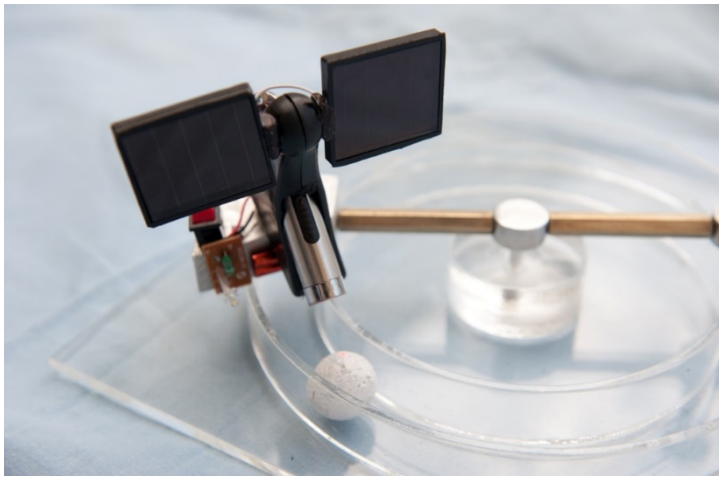


Рисунок 2 – Макет гравитационного тягача

В докладе рассматривается математическая модель гравитационного тягача и приводятся результаты моделирования. Проблема управления гравитационным тягачем требует высокой надежности вычислительной системы, вырабатывающей параметры орбиты гравитационного тягача.

A.O. Panov, A.A. Ivanov, A.V. Rogov, O.A. Shmakov

DYNAMIC SIMULATION OF THE MICRO-ROBOT ON A VEHICLE WITH STAR-LIKE WHEELS

SPbPU,CRDI RTC, Saint-Petersburg
a.panov@rtc.ru, al_ivanov@rtc.ru

Abstract

The description of the developed computer model and control system vehicle on the six star-shaped wheels is presented. The analysis of the dynamics of the vehicle with the six star wheels when moving on surfaces with obstacles by means of computer simulations was done. The algorithms of the coordinated control of the actuators which allow minimizes the angles of roll and yaw in time the movement on the plane and ensure the overcoming of the escarp and the doorsill which dimensions exceeding the diameter of the wheel are been suggested.

Keywords: robot, microrobotics, star wheel, mobile platform for mechatronic system, control system, computer simulation.

А.О. Панов, А.А. Иванов, А.В. Рогов, О.А. Шмаков

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ДВИЖЕНИЯ МИКРОРОБОТА НА ПЛАТФОРМЕ СО ЗВЁЗДООБРАЗНЫМИ КОЛЁСАМИ

СПбПУ, ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург
a.panov@rtc.ru, al_ivanov@rtc.ru

Аннотация

Приведено описание разработанных компьютерной модели и системы управления платформы на шести звёздообразных колёсах. Средствами компьютерного моделирования выполнен анализ динамики повозки на шести звёздообразных колёсах при перемещении по поверхности с

препятствиями. Предложены алгоритмы согласованного управления приводами, минимизирующие углы крена и рысканья при движении по плоскости и обеспечивающие преодоление эскарпа и порога с габаритами, превышающими диаметр колеса.

Ключевые слова: робот, микроробототехника, звёздообразное колесо, мобильная платформа, мехатронная система, система управления, компьютерное моделировани

Введение

Поиск конструктивных решений, позволяющих малогабаритным мобильным роботизированным платформам преодолевать соизмеримые с их габаритами препятствия, является одной из актуальных задач микроробототехники.

Традиционное решение мобильной платформы в виде повозки с колёсным движителем оказывается неэффективным при движении по пересечённой местности с неровностями, размеры которых сопоставимы с диаметром колеса. В этих условиях использование движителей, реализующих механизм перемещения по поверхности за счёт чередования конечного числа опор – шагания, оказывается более эффективно. Конструкция шагающей платформы должна содержать, как правило, не менее четырёх трёхстепенных педипуляторов с активными управляемыми шарнирами. Управление перемещением шагающей платформы представляет собой сложную задачу управления. Реализация такой малогабаритной конструкции связана с серьёзными технологическими трудностями. Поэтому конструктивные решения мобильных платформ с циклическим чередованием опор носят компромиссный характер, состоящий в применении колёс специальной формы [1 – 3].

Циклическое чередование опор может быть организовано с помощью колёс, имеющих звёздообразную форму с тремя лучами [4, 5]. Анализ конструкций показывает, что применение колёс без обода повышает возможности платформы по преодолению препятствий при передвижении в местности с неровностями, размеры которых сопоставимы с диаметром колеса, и позволяют реализовать регулярную походку с минимальным числом приводов.

Для создания такой мобильной платформы необходимо разработать и реализовать структуру системы управления движением, обеспечивающую управляемое перемещение в условиях малых случайных возмущений поверхности и при преодолении препятствий соизмеримых с габаритами робота.

Постановка задачи

Объектом моделирования является платформа на шести звёздообразных колёсах с одинаковыми независимыми приводами на каждом борту, оси вращения колёс неподвижны и параллельны. Схема платформы, реализующей статически устойчивое перемещение, представлена на рисунке 1.

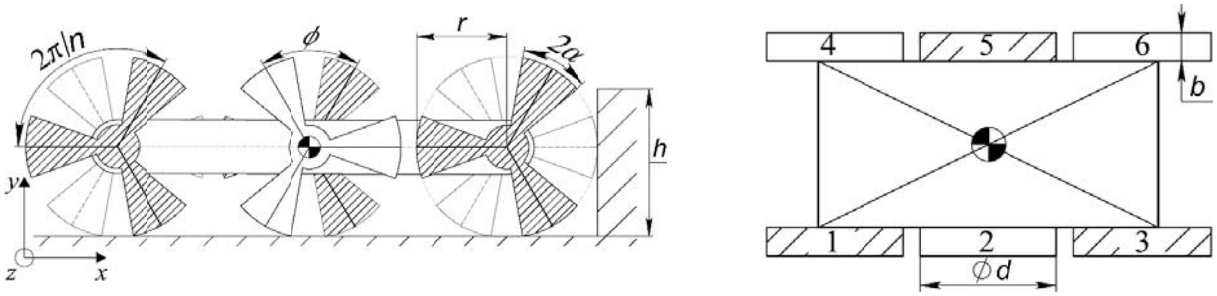


Рисунок 1 – Схема платформы на звёздообразных колёсах: вид сбоку и спереди

Компьютерная модель платформы со звёздообразными колёсами имеет в своём составе:

- математическую модель динамики твёрдых тел механических групп, включающую контактную модель Герца, модель кулоновского трения в местах контакта и в шарнирах;
- математическую модель электроприводов;
- математическую модель системы управления.

На рисунке 2 приведена структурная схема системы автоматического регулирования поворота и угловых скоростей колёс.

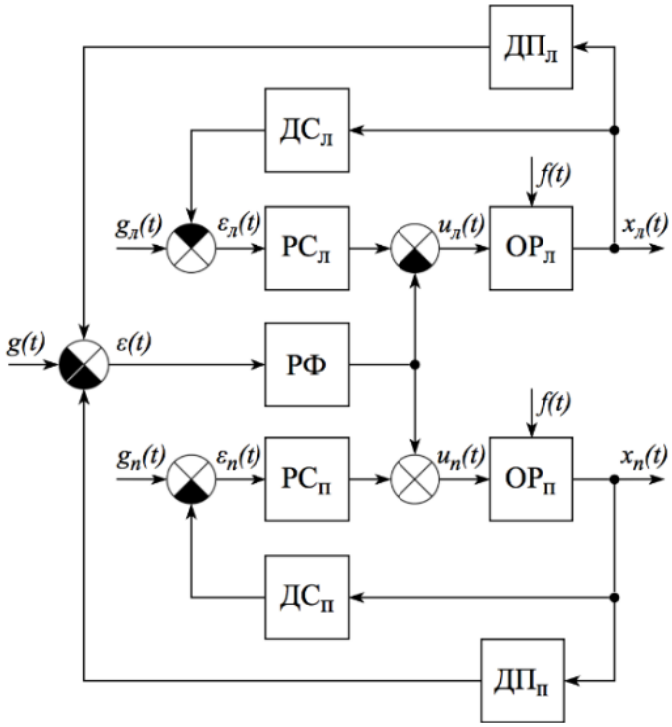


Рисунок 2 – Структурная схема системы автоматического регулирования

В состав схемы входит:

– ОР – объекты регулирования, представленные в виде тройки смещённых по фазе звёздообразных колёс левого и правого бортов, на которые действуют внешние возмущения $f(t)$ и выходные зависимости регуляторов $u(t)$;

– ДП, ДС – датчики положения и угловой скорости передней пары колёс, преобразующие измерительные величины $x_л(t)$ и $x_п(t)$ к общему виду с расчётом получения разностей $\varepsilon_л(t), \varepsilon_п(t), \varepsilon(t)$ на элементах сравнения и использовании их для осуществления процессов регулирования;

– РФ – регулятор фазы, на который действует разность преобразованных сигналов $x_л(t)$ и $x_п(t)$ с ДП и задающий сигнал $g(t)$;

– РС – регуляторы угловой скорости вращения троек колёс, на которые действуют разности преобразованных сигналов $x_л(t)$ и $x_п(t)$ с ДС и задающие сигналы требуемой угловой скорости $g(t)$

Моделирования динамики движений платформы с шестью звёздообразными колёсами проведено в пакете MSC.Adams с системой управления, построенной в Matlab/Simulink. Блоки регуляторов скорости и фазы структурной схемы автоматического регулирования реализованы универсальными блоками PID из библиотеки Simulink.

Движение по плоской поверхности

При движении по плоской поверхности наблюдаются отклонения платформы от курса в горизонтальной (xz) плоскости. Из графиков на рисунке 3 видно, что несоблюдение фазового смещения $\phi = \pi / 3$ в платформе на звёздообразных колёсах с тремя лучами относительно двух независимых бортов ведёт к возникновению отклонений в курсе движения. Повышение частоты вращения колёс при постоянной величине рассогласования приводит к росту отклонения траектории движения центра масс корпуса от прямой.

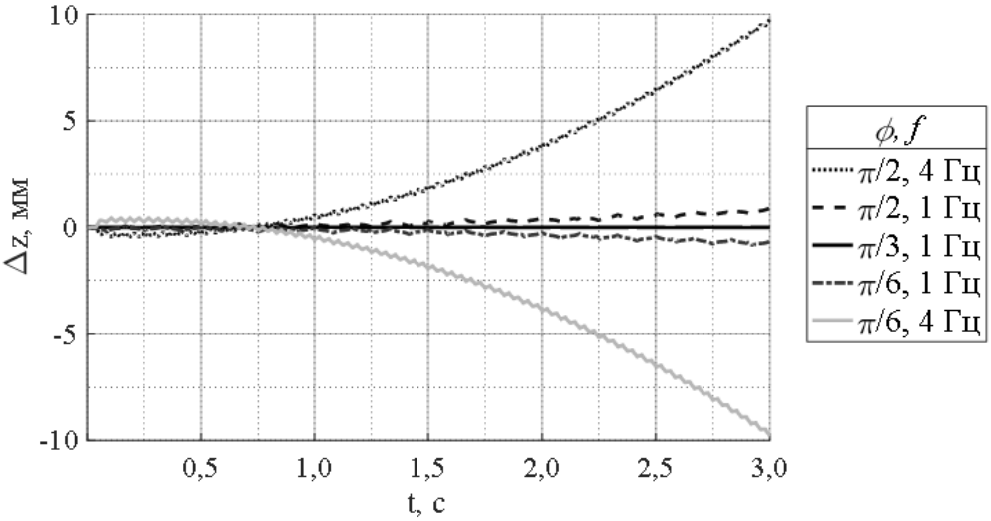


Рисунок 3 – Зависимости отклонения положения ЦМ от прямолинейной траектории в горизонтальной плоскости при различных величинах ϕ, f

Из графиков на рисунке 4 видно, чыто при синхронизированном вращении групп 1-5-3 и 4-2-6 колёс равнодействующие нормальных реакций левого и правого равны. При несинхронности (фазовое смещение отлично от $\pi / 3$) в сходственные моменты времени равнодействующие нормальных реакций отличаются, что приводит к развороту платформы и микро- смещениям и разворотами в окрестности реализуемой траектории (рисунок 3).

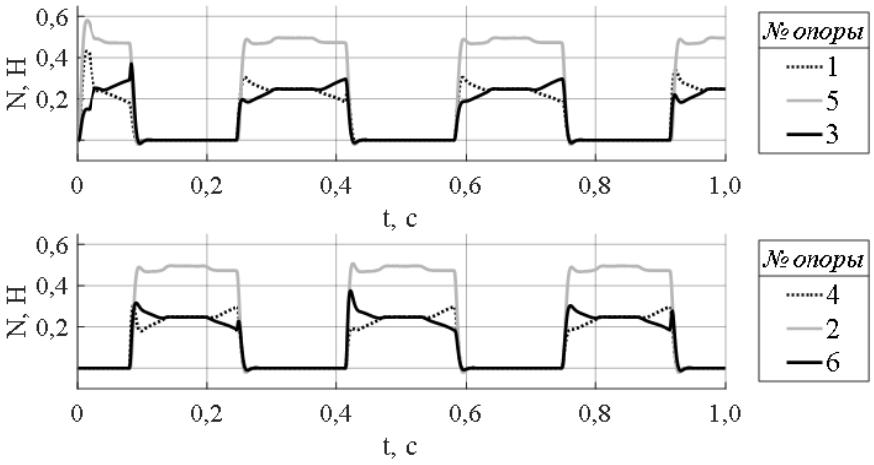


Рисунок 4 – Силы реакции групп 1-5-3 и 4-2-6 колёс

При подключении системы автоматического регулирования угловой скорости колёс левого и правого бортов и фазовой синхронизации между группами опорных колёс реализуется движение вдоль прямой. На рисунке 5 приведены графики зависимостей наблюдаемых угловых скоростей ω колёс от времени. Из графиков видно, что регулятор угловой скорости отрабатывает сигнал задания $\omega = 9 рад / с$ за 0,1 с. Процесс циклического притормаживания связан с ударными воздействиями в моменты появления контакта очередного «луча» колеса.

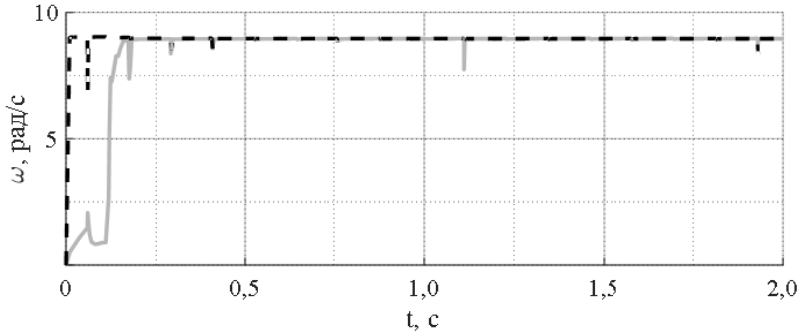


Рисунок 5 – Угловые скорости колёс бортов в зависимости от времени

Для образования штативной (статически устойчивой) походки необходимое фазовое смещение колёс между бортами должно быть равно $\pi / 3$. Из графика на рисунке 6 видно, что регулятор положения отрабатывает переход фазового смещения от 0 до $\pi / 3$ за 0,1 с.

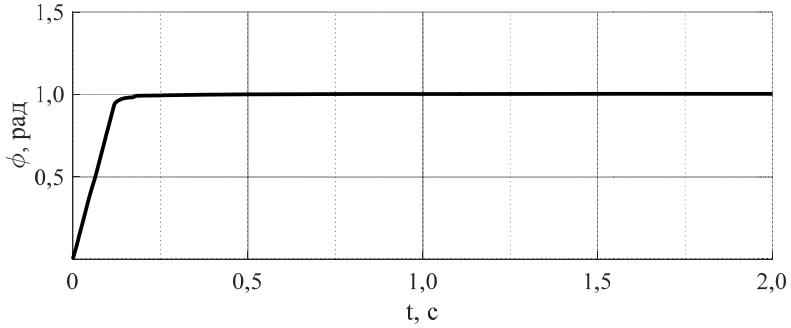
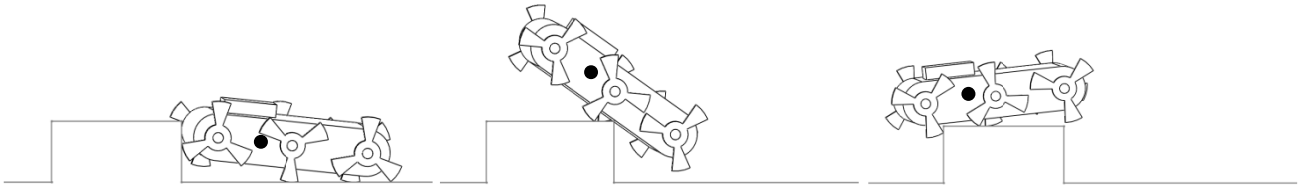


Рисунок 6 – Зависимость фазового смещения колёс от времени при моделировании СУ

Движение с преодолением габаритного препятствия

Компьютерный анализ динамики модели на полигоне, в состав которого входит габаритное препятствие, подтвердил повышенную проходимость платформы на базе колёс дискретной формы в сравнении с платформой на обычных колёсах. На рисунке 7 приведены три характерных последовательных кадра преодоления компьютерной моделью препятствия, полученные из анимационного окна постпроцессора MSC.Adams.



t = 1,16 c t = 1,73 c t = 1,97 c

Рисунок 7 – Преодоление габаритного препятствия моделью на базе шести звёздообразных колёсах (черная точка – положение ЦМ)

Параметрическое исследование показало, что смещение центра масс платформы относительно оси средней пары колёс в сторону направления движения приводит к увеличению высоты преодолеваемого препятствия, что объясняется появлением полезного опрокидывающего момента относительно угловой точки препятствия.

Заключение

Компьютерная модель позволяет выполнять виртуальные эксперименты для платформы на шести звёздообразных колёсах с заданными массовыми и геометрическими параметрами.

Реализация структурной схемы системы автоматического регулирования с помощью библиотеки блоков Simulink и подключение к механической модели в MSC.Adams позволят провести оценку её эффективности в варьируемых условиях.

Построенная компьютерная модель мобильной платформы позволяет получать необходимую для проектирования и изготовления макетного образца информацию и предсказывать его поведение при движении в сложноструктурированной среде с учётом инерциальности приводов и системы управления системы управления.

1. Morrey J.M., Lambrecht B., Horchler A.D. Highly mobile and robust small quadruped robots / International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). – 2003. – № 1. – October 27 – 31. – pp. 82 – 87.
2. Zarrouk D., Pullin A.O., Kohut N.J. STAR – A sprawl tuned autonomous robot / International Conference on Robotics and Automation (ICRA). – 2013. – May 06 – 10. – pp. 20 – 25.
3. Park J., Kim K., Kim Y.K. Design of the Locomotive Mechanism by Analysis on Behavior of Pill Bugs for a Small Robot / Journal of Institute of Control. Robotics and Systems. – 2012. – № 18/2. – February. – pp. 81 – 86.
4. Панов А.О. Компьютерное моделирование динамики микроробота на платформе со звёздообразными колёсами / Выпускная работа магистра, СПбГПУ, Институт ММиТ, кафедра «Мехатроники и роботостроения» (при ЦНИИ РТК). – СПб.. – 2016. – 65 с.

5. Панов А.О., Иванов А.А. Анализ динамики движения мобильного робота на платформе с трёхлепестковыми колёсами / Научный форум с международным участием «Неделя науки СПбГПУ»: материалы научно-практической конференции. – 2015. – С. 398 – 401.

V.V. Varlashin, A.A. Ivanov, A.V. Rogov, O.A. Shmakov

MODELING THE GAITS OF A WALKING ROBOT ON A PLANE

SPbPU,CRDI RTC, Saint-Petersburg
botanic-8@yandex.ru, al_ivanov@rtc.ru

Abstract

Developed virtual dynamic model of quadruped walking robot including mechanical model in MSC Adams and control system model in Matlab Simulink. Completed computer modeling of quadruped robot walking on the plane terrain with the statically stable and dynamically stable gaits. To eliminate the effect of robot evasion identified during simulation proposed workable algorithm of correction gait parameters. The structure of computer model allows using developed Matlab Simulink block in control system of a real robot.

Keywords: computer model, quadruped robot; gait modeling, static gait; dynamic gait, center of mass trajectory.

В.В. Варлашин, А.А. Иванов, А.В. Рогов, О.А. Шмаков

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОХОДОК ШАГАЮЩЕГО РОБОТА НА ПЛОСКОСТИ

СПбПУ, ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург
botanic-8@yandex.ru, al_ivanov@rtc.ru

Аннотация

Разработана виртуальная динамическая модель четырёхногого шагающего робота, включающая MSC Adams механическую модель и Matlab Simulink модель системы управления. Выполнено моделирование статически устойчивой и динамически устойчивой походок четырехногого робота на плоскости. Для устранения выявленного при моделировании эффекта уклонения робота от задаваемой траектории предложен работоспособный алгоритм коррекции параметров походки. Структура компьютерной модели позволяет использовать разработанный блок Matlab Simulink в контуре управления реального робота.

Ключевые слова: компьютерная модель, четырехногий робот, моделирование походок, статическая походка, динамическая походка, траектория центра масс.

Введение

Одним из направлений современной робототехники является разработка роботов, которые используют для передвижения шагающие движители – педипуляторы. Система управления шагающего робота (ШР) должна обеспечивать построение походки, координацию движения педипуляторов и стабилизацию положения корпуса в пространстве, генерируя и отрабатывая требуемые движения педипуляторов. Компьютерное динамическое моделирование позволяет предсказать поведение робота, управляемого реализующей алгоритмы и правила системой управления.

Тип походки ШР зависит от шаблона чередования опорных педипуляторов и траекторий движения опорных точек относительно корпуса робота. Траектория движения, как правило, выбирается из условий непрерывности и гладкости кривой и удобства параметризации её в зависимости от длины шага и высоты подъёма опорной точки. Необходимое пространственное движение опорной точки относительно корпуса робота обеспечивает педипулятор с тремя независимыми шарнирами вращения, угловые координаты которых связаны с декартовыми координатами его концевой (опорной) точки явными аналитическими зависимостями. Законы перемещения концевой и расположенной на корпусе корневой точек по траекториям определяют динамику педипулятора и шагающего робота в целом.

Задача анализа динамики походки ШР требует использования компьютерной модели, основанной на уравнениях динамики системы твердых тел с неудерживающими связями. Для реализации такой модели в работе используется пакет MSCAdams. Полноценная модель робота включает модели приводов и системы управления, для моделирования которых в работе используется пакет SimulinkMatlab. Взаимодействие SimulinkMatlab и MSCAdams обеспечивается стандартными инструментами пакетов. Выбор такого набора программных инструментов для построения модели обеспечивает возможность переноса разработанной

системы управления с помощью Simulink Desktop Real-Time на бортовой компьютер ШР и существенно ускоряетпрототипирование и программно-аппаратное тестирование системы управления ШР.

Структура модели

Компьютерная модель четырехногого шагающего робота включает:

- математическую модель динамики системы твердых тел;
- математическую модель приводов, включающую модель передаточного шарнирно-рычажного механизма, модель электродвигателя и модель его силовых цепей;
- математическую модель системы управления.

На рисунке 1 представлены кинематическая схема робота (слева) и внешний вид модель (справа) в окне препроцессора MSC.Adams.

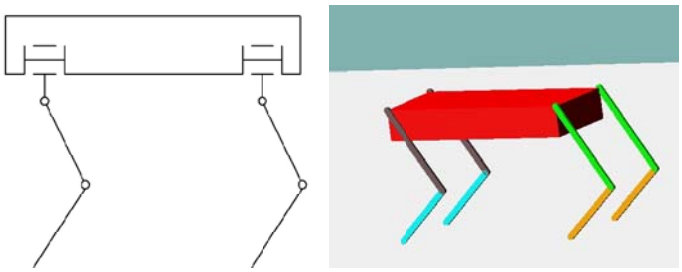


Рисунок 1 – Схема расположения шарниров робота и изометрический вид модели

Педипуляторы и корпус моделируются твёрдыми телами с задаваемыми масс-инерционными характеристиками. Контактные усилия моделируются с помощью инструмента CONTACT пакета MSC.Adams [1]. Изображение модели в виде примитивов используется для ускорения графического отображения при моделировании.

Функциональная схема модели четырехногого шагающего робота приведена на рисунке 2.

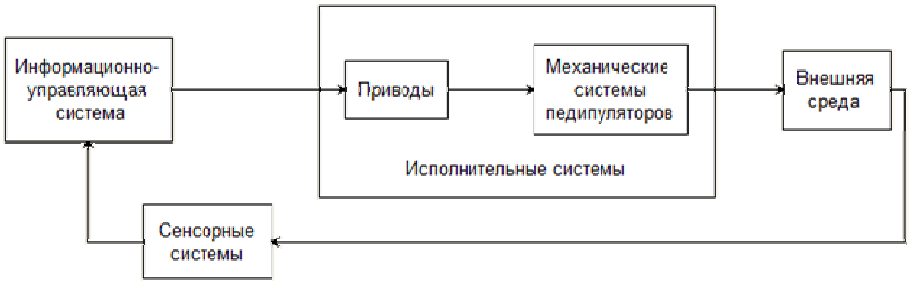


Рисунок 2 – Функциональная схема робота

Структура модели системы управления (рисунок 3) разделена на два иерархических уровня (блока):

- блок управления роботом;
- блок управления приводами.

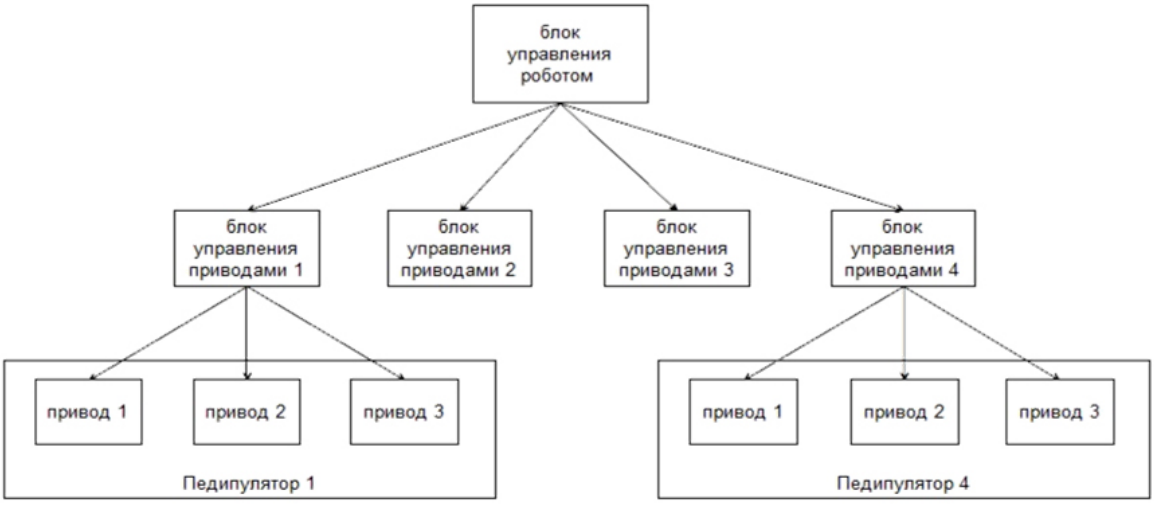
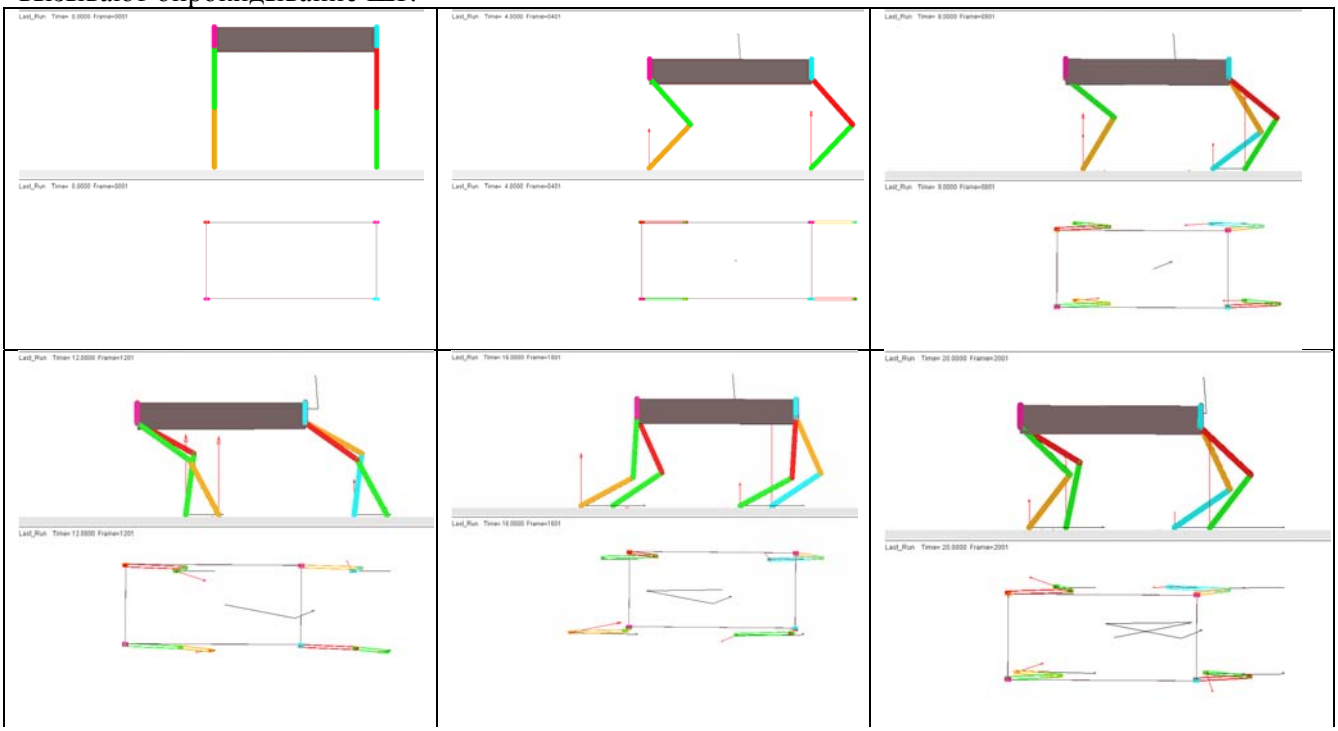


Рисунок 3 – Функциональная схема модели системы управления робота

Система управления представляет собой подключаемые dll-библиотеки блока управления роботом и блок управления приводами [2]. На вход блока управления роботом подаются следующие параметры: длина шага, высота шага, высота движения несущей платформы над опорной поверхностью, а так же длительность опорной и переносной фаз, геометрические размеры звеньев педипуляторов. Так же на вход подаются измеренные угловые координаты корпуса, нормальные реакции в опорных точках и ускорения центра масс. В роли выходных значений системы управления выступают трехмерные координаты опорных точек педипуляторов в системах координат, связанных с корпусом ШР. Выходные координаты представлены двумя наборами координат: сферическим и декартовым. В качестве головного модуля модели выступает пакет MSC.Adams. Блоки системы управления подключены с помощью плагина Control.Подключение систем управления в виде отдельных элементов соответствует модульному принципу построения роботов, позволяя переносить готовые системы управления из компьютерной модели в реальное устройство.

Моделирование статически устойчивой походки на плоскости

Статически устойчивая походка характеризуется выполнением условия равновесия робота во всех фазах движения. В контакте с опорной плоскостью участвуют не менее трёх педипуляторов. При переносе одного из четырёх педипуляторов проекция центра масс ШР на плоскость находится внутри треугольника, образованного опорными точками. Алгоритм выполнения шага состоит из двух этапов: перемещение центра масс внутрь опорного треугольника, перенос опорной точки свободного педипулятора в новое место. На рисунке 4 представлены последовательные фазы движения (слева-направо, сверху-вниз). В качестве целевой точки для переноса центра масс системы задаётся центр окружности, вписанной в опорный треугольник. Это позволяет обеспечить зону равновесных состояний ШР и не контролировать положение точки во время переноса свободного педипулятора. Траектория движения центра масс корпуса на опорной плоскости изображена на видах сверху и представляет зигзагообразную ломаную с возвратными петлями. Средняя скорость перемещения ШР рассмотренной походкой невелика, так как движение по такой траектории связано с разгоном-торможением и движением в обратном желаемому направлении. Увеличение угловых скоростей в шарнирах педипуляторов приводит к росту сил инерции, которые вызывают опрокидывание ШР.



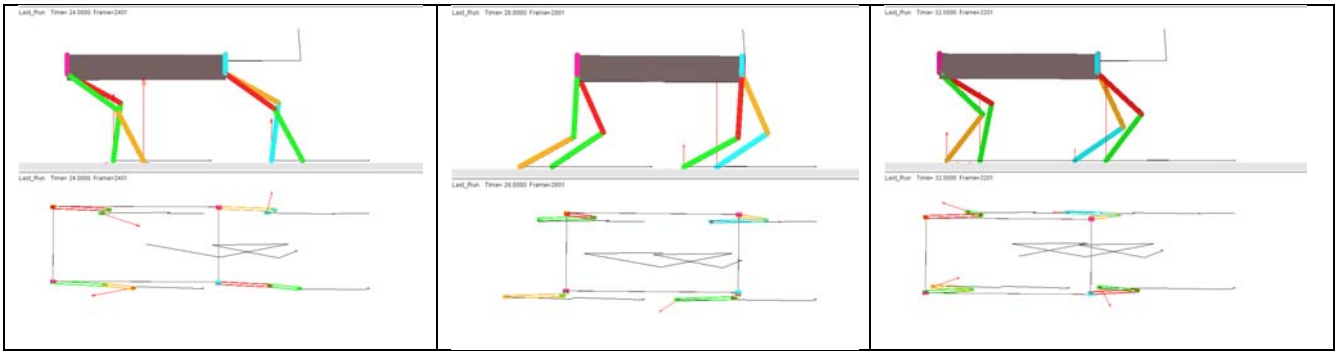


Рисунок 4 – Статически устойчивая походка

Моделирование динамической походки

Динамическая походка содержит опорные фазы неустойчивого равновесия на двух педипуляторах. В работе выполнено моделирование походки «медленная рысь», в которой чередуется опирание на пары диагонально расположенных педипуляторов. Программное движение в коленном и бедренном шарнирах задаётся из допущения о плоском движении педипулятора. Характерные зависимости от времени координат опорной точки педипулятора приведены на графиках рисунка 5.

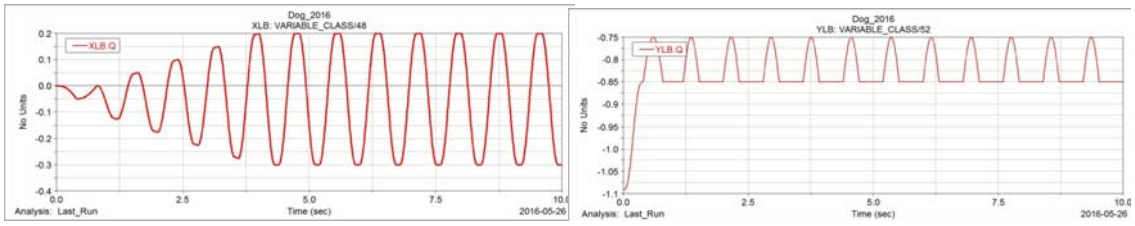


Рисунок 5 – Законы движения опорной точки педипулятора по осям x и y

Бедренный шарнир приведения/отведения используется для стабилизации движения по датчику угла крена робота. Измеренное значение угла подаётся в качестве угловой координаты в коревых шарнирах опорных, тем самым обеспечивается вертикальное расположение ног в процессе движения робота. В начальный момент времени происходит медленное увеличение величины длины шага, и, как следствие, перемещения по координате x с целью обеспечения плавного старта движения робота.

В процессе проведения моделирования шагания робота обнаружена проблема с отклонением робота от прямолинейного направления движения в результате проскальзывания ног робота в процессе ходьбы. На рисунках 6 и 7 приведены перемещения центра масс робота по координатам x и z.

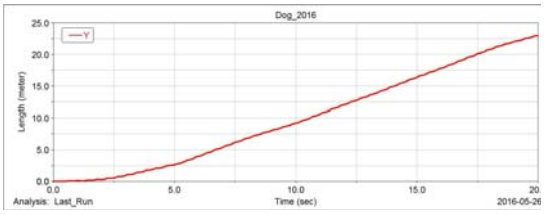


Рисунок 6 – Зависимость от времени перемещения центра масс корпуса робота по координате x

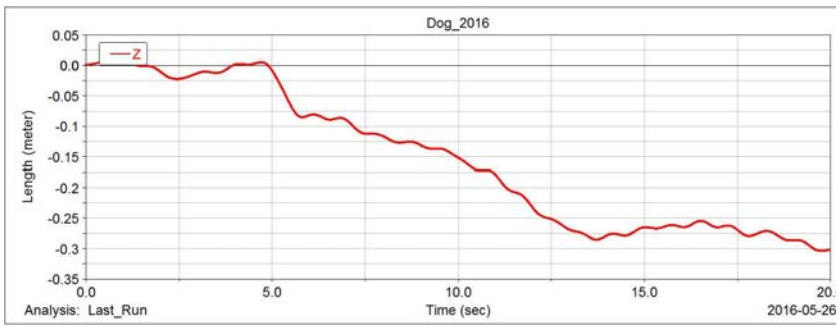


Рисунок 7 – Зависимость от времени перемещения центра масс корпуса робота по координате z

Для решения проблемы отклонения робота от прямолинейного направления движения предложен алгоритм стабилизации положения робота по углу рыскания, заключающийся в увеличении длины шагов педипуляторов [3]. На рисунке 8 приведена зависимость поперечного смещения центра масс корпуса робота при движении робота со стабилизацией. Результаты моделирования показали, что

отклонение робота от прямолинейного движения сократилось с величины отклонения 0,3 м до 0,05 м. Отрицательным действием алгоритма является незначительное снижение скорости движения робота. Из сравнения рисунков 6 и 9 видно, что робот за 20 с прошел на 2,5 м меньше.

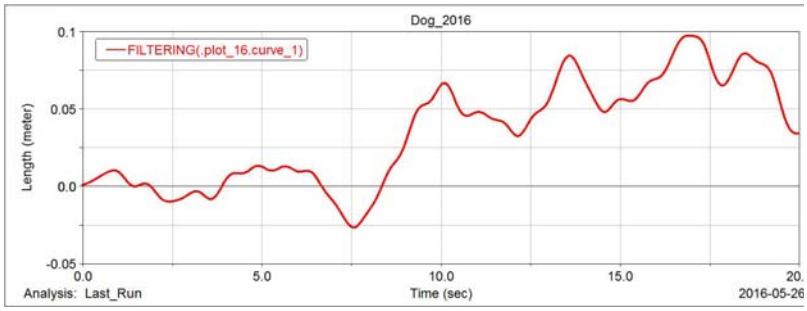


Рисунок 8 – Зависимость от времени перемещения центра масс корпуса робота по координате z при работающей стабилизации

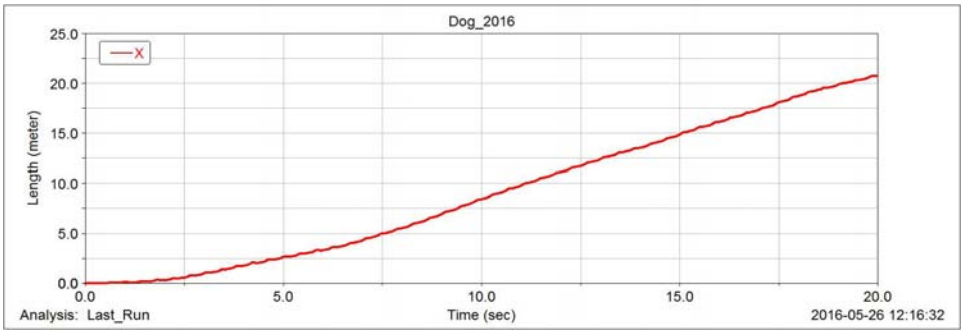


Рисунок 9 – Зависимость от времени перемещения центра масс корпуса робота по координате x при работающей стабилизации

Выводы

Разработана модель системы управления четырехногого шагающего робота, реализующая метод управления прямолинейным движением робота. Проведено моделирование динамики походки четырехногого шагающего робота. Выявлена проблема, связанная с отклонением движения робота от прямолинейного при реализации походки. Для решения этой проблемы предложен и реализован алгоритм стабилизации положения робота по рассогласованию желаемого и действительного угла рыскания.

1. Иванов А. А. MSC.ADAMS: Теория и элементы виртуального конструирования и моделирования: учеб. пособие. М.: Московское представительство MSC.SoftwareGmbH, 2003. – 97 с.
2. Варлашин В.В., Иванов А.А., С.Г. Чупров. Компьютерная модель испытательного стенда педипулятора с тремя степенями подвижности / Научный форум с международным участием «Неделя науки СПбПУ»: материалы научно-практической конференции. – 2015. – 30 ноября – 5 декабря. – с. 330–333.
3. Варлашин В.В. Моделирование динамики четырехногого шагающего робота / Выпускная работа бакалавра, СПбПУ, Институт ММиТ, кафедра «Мехатроники и роботостроения» (при ЦНИИ РТК). – СПб.. – 2016. – 69 с.

A.A. Ghukasyan

ON THE MODELING OF MAINTENANCE PROCESSES OF TECHNOLOGICAL AREA BY MANIPULATOR

Institute of Mechanics of NAS Armenia, Goris State University
ghukasyan10@yandex.ru

Abstract

The results of modeling of technological area, the main element of which is the controlled multilink manipulator are presented. The manipulator had to provide the continuous operation of objects, depending on the technological purpose. It is assumed that in the process of maintenance the dynamic characteristics of the manipulator depending on the weight of the load or tool could be transformed in some

final moments of the time. In general, the description of the maintenance process is brought and the question of control in a case when the motion of the manipulator at each service interval is described by linear differential equations with constant coefficients, as well as the dynamics of motion of the objects are given.

Key words: manipulator, technological area, maintenance process, controllability matrix, modeling.

In practice, there are variety problems of maintenance that can be solved with the use of manipulators controlled or adaptive manipulation robot, equipped with a system of technical vision, sensor element and other elements of artificial intelligence $[1-3]$.

Let us considered the model of technological area, which consist of k movable or stationary objects (targets) and controlledmultilink manipulator. The problem of manipulator is the maintenance of continuous operation of facilities such as conveyors, machine-tools, warehouses with details or technology tools, depending on the technological purposes.

In general, the motion of i objects can be written as following:

$$\ddot{\mathbf{y}}^i = \mathbf{g}^i\left(\mathbf{y}, \dot{\mathbf{y}}\right)\ \left(i = 1,2,\cdots,k\right) \tag{1}$$

with conditions

$$\left(\mathbf{y}^i\left(t_{i-1}\right), \dot{\mathbf{y}}^i\left(t_{i-1}\right)\right) \in \mathbf{G}_y^i\ \left(i = 1,2,\cdots,k\right) \tag{2}$$

where $\mathbf{y}^i = \left(y_1^i, y_2^i, \cdots y_m^i\right)$ -is thevector of generalized coordinates of i objects $\left(i = 1,2,\cdots,k\right)$, $\mathbf{G}_y^i$ -2m- is the dimensional area of initial conditions of motion of objects.

The differential equation describing the motion of the manipulator on i maintenance phase, can be expressed as

$$\ddot{\boldsymbol{\alpha}}^i = f^i\left(\boldsymbol{\alpha}, \dot{\boldsymbol{\alpha}}, \mathbf{u}, \boldsymbol{\omega}^i\right), \boldsymbol{\alpha} \in \mathbf{S}, \mathbf{u} \in \left\{\mathbf{U}\right\}, \tag{3}$$

$$\boldsymbol{\omega}^i \in \left\{\boldsymbol{\Omega}\right\}\ \left(i = 1,2,\cdots,k\right)\left(\boldsymbol{\alpha}^i\left(t_{i-1}\right), \dot{\boldsymbol{\alpha}}^i\left(t_{i-1}\right)\right) \in \mathbf{G}_\alpha^i, \tag{4}$$

where $\mathbf{G}_\alpha^i$ -2l the dimensional area of initial conditions of motion of objects, vector of generalized coordinates (vector components $\boldsymbol{\alpha}$- can be angle at hinge and parameters describing the linear displacement of links, as well as Cartesian coordinates of the base) $\mathbf{u}$ - manipulator control vector (the components of vector $\mathbf{u}$ - could be electromagnetic forces and moments developed by actuators located in the hinges and in the base of the manipulator). $\mathbf{S}$ - part of the technological space, $\left\{\mathbf{U}\right\}$ -convex area, characterizing the manage ability. $\boldsymbol{\omega}^i$ - vector defining the parameters, included in the equations of motion of the manipulator, which may change after each meeting with the objects, $\left\{\boldsymbol{\Omega}\right\}$ - valid values area of parameter $\boldsymbol{\omega}^i$.

In practical problems as a parameter $\boldsymbol{\omega}^i$ can protrude the mass of load carried by the manipulator or a tool $[4]$.

In the manipulator control problems for a meeting with the objects is necessary to set a generalized coordinates of clamp relative to the selected coordinate system.

Generalized coordinates of clamp denoted by the vector $\mathbf{q} = \left(q_1, q_2 \cdots, q_N\right)$ where

$$\mathbf{q} = \tilde{\mathbf{f}}\left(\boldsymbol{\alpha}\right), \dot{\mathbf{q}} = \tilde{\mathbf{F}}\left(\boldsymbol{\alpha}\right)\dot{\boldsymbol{\alpha}}, \tilde{\mathbf{F}}\left(\boldsymbol{\alpha}\right) = \left\{\partial \tilde{f}_i \Big/ \alpha_j\right\}_{i,j=1}^{N,l} \tag{5}$$

Herein $\tilde{\mathbf{f}}\left(\boldsymbol{\alpha}\right)$ - specified $N-$dimensional vector-function,structure of which depends on the choice of generalized coordinates and the manipulator geometry; $\tilde{\mathbf{F}}\left(\boldsymbol{\alpha}\right)$ - Jacobian, having highest rank $\left(\min\left(l, N\right)\right)$.

In the simulation of manipulator motion, as a main element of the technological process, it is necessary to take into account both, structural features and the elastic suppleness of the links.

An efficient control of elastic robots is possible only through the elaboration of special control modes, taking into account the impact of the elastic properties of the links in the service. $[1,5-8]$.

Manipulator motion with purpose to service objects (1) begins at moment t_0 and ends at T (T - can be specified or determined from additional conditions).Starting from the moment t_0 until T , the manipulator have to implement the meeting with objects (1) at time moments $t_1, t_2, \cdots, t_k$ where t_i- meeting point of the manipulator with i object $i = 1, 2, \cdots, \mathrm{k}$. These conditions are for variables $\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}$ and $\mathbf{y}^i, \dot{\mathbf{y}}^i$, in general, can be represented as follows:

$$\left(\mathbf{q}(t_i), \dot{\mathbf{q}}^i(t_i), \mathbf{y}^i(t_i), \dot{\mathbf{y}}(t_i)\right) \in \mathbf{G}^i_{\mathrm{q},y} \left(i = 1,2,\cdots,k\right) \tag{6}$$

Or with considering (5), for variables $\boldsymbol{\alpha}^i, \dot{\boldsymbol{\alpha}}^i$ и $\mathbf{y}^i, \dot{\mathbf{y}}^i$ in the form of

$$\left(\boldsymbol{\alpha}^i(t_i), \dot{\boldsymbol{\alpha}}^i(t_i), \mathbf{y}^i(t_i), \dot{\mathbf{y}}^i(t_i)\right) \in \mathbf{G}^i_{\alpha,y} \left(i = 1,2,\cdots,k\right) \tag{7}$$

Herein $\mathbf{G}^i_{q,y}$ and $\mathbf{G}^i_{\alpha,y} \left(i = 1,2,\cdots,k\right)$-2(N+m) and 2($l + m$)measuring areas. The residence time of the manipulator near each object is not considered, it means that at time moment $t_i$the manipulator is maintaining the object under the number i and instantlydirected to another object (assumption justified as far as $\tau/(T-t_0) \ll 1$, where τ-is the time spent manipulator near the object, and $\left(T - t_0\right)$- is the time of service process). i.e. time moment t_i $\left(i = 1,2,\cdots,k\right)$ is considered to be the start of manipulator motion for the service the object under the number $\left(i+1\right)$.

Conditions (6) and (7) are additional requirements for the motion of the manipulator and objects.
Another joint requirement are also possible, imposed both on a manipulator motion parameters and objects service, as well as on the control forces and moments developed by actuators.

These requirements can be formally represented as

$$\left(\boldsymbol{\alpha}^i(t_i), \dot{\boldsymbol{\alpha}}^i(t_i), \mathbf{y}^i(t_i), \dot{\mathbf{y}}^i(t_i), u^i\right) \in \mathbf{G}^i_{\alpha,y,u} \left(i = 1,2,\cdots,k\right) \tag{8}$$

Note, if the sequence of service the objects by manipulator is fixed, then the task on each stage of the movement $\left[t_{i-1}, t_i\right]$ reduced to normal problem of control or optimal control with fixed or free boundary conditions $\left[9,10\right]$. Minimization functional at each stage can be expressed as

$$I_i = I\left[t_i, t_{i+1}, \boldsymbol{\alpha}^i, \dot{\boldsymbol{\alpha}}^i, \mathbf{u}^i, \boldsymbol{\omega}^i\right] \to \min_{\mathbf{u}^i \in \{\mathbf{U}\}} \left(i = 0,1,2,\cdots,k-1\right) \tag{9}$$

In the case where a sequence of service and the meetings with the objects are not fixed, an initial control problem can be formulated as a problem of finding sequence of objects service and the meeting time and the functional (9) are depending from the sequence of objects service.

From point of view of the technologicalprocess an important quality criterion is also considered to be the rational use of the technological area ($\mathbf{S} \to \min$) $\left[3\right]$.

This criterion is the geometrical and impose additional restrictions on the parameters of the manipulator motion.In this model, the process consisting of conveyors, carts with details and adaptive manipulator

In $\left[3\right]$ is taking into account the model of technologicalprocess, consisting of conveyors, carts with details and adaptive manipulator.

Manipulator optimally provide an operation of conveyors with necessarydetails, choosing the sequence of service via a force sensor located in the internal surface of the gripper.

From (1), (3), (6)-(9) follows, that the formulated maintenance process can be regarded as the result of purposeful control movement of composite dynamical systems (1), (3) at time intervals $\left[t_{i-1}, t_i\right]$ $\left(i = 1,2,\cdots,k\right)$ by the following conditions of continuity between them

$$\left(\boldsymbol{\alpha}^{\mathbf{i}}(\mathbf{t_i}), \dot{\boldsymbol{\alpha}}^{\mathbf{i}}(\mathbf{t_i}), \mathbf{y}^{\mathbf{i}}(\mathbf{t_i}), \dot{\mathbf{y}}^{\mathbf{i}}(\mathbf{t_i}), \boldsymbol{\alpha}^{\mathbf{i+1}}(\mathbf{t_i}), \dot{\boldsymbol{\alpha}}^{\mathbf{i+1}}(\mathbf{t_i})\right) \in \boldsymbol{\Phi}^i, \left(i = 1,2,\cdots,k\right) \tag{10}$$

Condition (10) means that at moment time $t_i$final state $i-$dynamical system (1), (3)and the initial state $\left(i+1\right)$ of system (3)belong to some $2\left(m+l\right)$-dimensional area $\boldsymbol{\Phi}^i$ $\left(i = 1,2,\cdots,k\right)$. From a mathematical point

of view (10) gives a possibility to consider the process of service manipulator of technological area as a control of manipulator motion with variable dynamics and set intermediate states.

In the works [11,12] have been investigated the question of the optimal control of composite systems and determined the conditions of optimality in the intermediate state control problems. For efficient investigation of the service process are essential as the question of control at different stages, as well as the controllability of the whole system.

In the case when the motion of the manipulator at each service interval is described by linear differential equations with constant coefficients, and the dynamics of the motion of objects is given, the matrix of controllability of the whole system and the conditions of controllability of process of service in whole are obtained by the method of mathematical induction.

1. Chernousko F. L., Bolotnik N. N., Gradetsky V. G. Manipulation Robots. M.: Nauka, 1989, 363 p.
2. Yurevich E.I. (Ed) Dynamics of robotic control. Moscow, “Nauka” 1984. 336p. (in Russian).
3. Ghukasyan A.A. A problem of optimal modelling of technological processes served by a manipulator robot. Proceeding AS Arm SSR, Mechanics, V.39, №6, 1986, p39-49.
4. Ghukasyan A.A., Matevosyan A.G. About controlled movement of a material, point of unset mass. Proceeding of NAS RA, Mechanics, №1, 2002, c.75-81.
5. Akulenko, L.D., Bolotnik, N.N. Synthesis of Optimal Control of Transport Motions of Manipulation Robots, MTT, №4, 1986, p.21-29.
6. Ghukasyan A.A On the kinematics of multilink manipulator motion with elastic connecting nodes and elastic links. //Proceeding of NAS RA, Mechanics. 2014. V.67. №3. P.68-83.
7. Ghukasyan A.A.On Kinematic Control of Elastic Two-Link Manipulator Clamp Motion. // Reports, NAS Armenia. 2014. V.114. № 4. P.316-324 .
8. Ghukasyan A.A. On a spatial position and deformation of manipulator elastic links// Proceeding of NAS RA, Mechanics. 2014. V.67. №4. P.53-64.
9. Krasovskii N.N The Theory of Motion Control. Moscow, Nauka,1968, 475 p. (in Russian).
10. Lee E.B, Markus L. Foundations of optimal control theory M.: Nauka, 1972, 574 p.
11. Velichenko V.V. Optimal control of composite systems. Dokl. Akad. Nauk SSSR, V.176. №4.1967. p.754-756., (in Russian).
12. Velichenko V.V. Optimality conditions in the problems of control with intermediate conditions. Dokl. Akad. Nauk SSSR,V.174, №5, 1967. p.1011-1013.

А.А. Гукасян

О МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЦЕССА ОБСЛУЖИВАНИЯ МАНИПУЛЯТОРОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УЧАСТКА

Институт механики НАН Армении, Государственный университет Гориса
ghukasyan10@yandex.ru

Аннотация

Приводится результаты моделирования технологического участка, основным элементом которого является управляемый многозвенный манипулятор. Манипулятор должен обеспечивать непрерывную работу объектов в зависимости от технологического назначения. Предполагается, что в процессе обслуживания, динамические характеристики манипулятора в зависимости от массы переносимого груза или инструмента может изменяться в некоторые конечные моменты времени. В общем случае приводятся описания процесса обслуживания и исследуются вопросы управляемости в случае, когда движение манипулятора на каждом интервале обслуживания описывается линейными дифференциальными уравнениями с постоянными коэффициентами, а динамики движения объектов заданы.

Ключевые слова: манипулятор, технологический участок, процесс обслуживания, матрица управляемости, моделирование.

На практике имеют место различные задачи обслуживания, которые могут быть решены с использованием манипуляторов с программным управлением или адаптивного манипуляционного робота, оснащенного системой технического зрения, чувствительным элементом и другими элементами искусственного интеллекта [1−3]. Рассмотрим модель технологического участка, которая

состоит из k подвижных или неподвижных объектов (целей) и управляемого многозвенного манипулятора. Задача манипулятора состоит в том, что он должен обслуживать непрерывную работу объектов, в качестве которых могут быть конвейеры, станки, склады с деталями или технологическими инструментами, в зависимости от технологического назначения.

В общем случае движение i-го объекта зададим уравнением

$$\ddot{\mathbf{y}}^i = \mathbf{g}^i\left(\mathbf{y}, \dot{\mathbf{y}}\right)\left(i = 1,2,\cdots,k\right) \tag{1}$$

с условиями

$$\left(\mathbf{y}^i\left(t_{i-1}\right), \dot{\mathbf{y}}^i\left(t_{i-1}\right)\right) \in \mathbf{G}_y^i\left(i = 1,2,\cdots,k\right) \tag{2}$$

где $\mathbf{y}^i = \left(y_1^i, y_2^i, \cdots y_m^i\right)$-вектор обобщенных координат i-го объекта $\left(i = 1,2,\cdots,k\right)$, $\mathbf{G}_y^i$-$2m$ мерная область начальных условий движений объектов.

Дифференциальное уравнение, описывающее движение манипулятора на i-ом этапе обслуживания, можно представить в виде

$$\ddot{\boldsymbol{\alpha}}^i = f^i\left(\boldsymbol{\alpha}, \dot{\boldsymbol{\alpha}}, \mathbf{u}, \boldsymbol{\omega}^i\right), \boldsymbol{\alpha} \in \mathbf{S}, \mathbf{u} \in \left\{\mathbf{U}\right\}, \tag{3}$$

$$\boldsymbol{\omega}^i \in \left\{\boldsymbol{\Omega}\right\}\left(i = 1,2,\cdots,k\right)\left(\boldsymbol{\alpha}^i\left(t_{i-1}\right), \dot{\boldsymbol{\alpha}}^i\left(t_{i-1}\right)\right) \in \mathbf{G}_\alpha^i, \tag{4}$$

где $\mathbf{G}_\alpha^i$-$2l$ мерная область начальных состояний движений манипулятора, $\boldsymbol{\alpha} = \left(\alpha_1, \alpha_2, \cdots, \alpha_l\right)$- вектор обобщенных координат (компонентами вектора $\boldsymbol{\alpha}$ - могут быть углы в шарнирах и параметры, описывающие линейные перемещения звеньев, а также декартовые координаты основания), $\mathbf{u}$- вектор управления манипулятором (компонентами вектора $\mathbf{u}$ могут являться электромагнитные силы и моменты, развиваемые приводами, находящимися в шарнирах и в основании манипулятора), $\mathbf{S}$- часть технологического пространства, $\left\{\mathbf{U}\right\}$ - выпуклая область, характеризующая возможность управления. $\boldsymbol{\omega}^i$ - вектор, определяющий параметры, входящие в систему уравнений движения манипулятора, которая может изменяться после каждой встречи с объектами, $\left\{\boldsymbol{\Omega}\right\}$ - область допустимых значений параметра $\boldsymbol{\omega}^i$. В практических задачах в качестве параметра $\boldsymbol{\omega}^i$ могут выступать массы переносимого манипулятором груза или инструмента $\left[4\right]$.

В задачах управления манипулятором, для обеспечения встречи с объектами необходимо также задать обобщенные координаты схвата относительно выбранной системы координат. Обобщенные координаты схвата обозначим через вектор $\mathbf{q} = \left(q_1, q_2 \cdots, q_N\right)$, где

$$\mathbf{q} = \tilde{\mathbf{f}}\left(\boldsymbol{\alpha}\right), \dot{\mathbf{q}} = \tilde{\mathbf{F}}\left(\boldsymbol{\alpha}\right)\dot{\boldsymbol{\alpha}}, \tilde{\mathbf{F}}\left(\boldsymbol{\alpha}\right) = \left\{\partial \tilde{f}_i \Big/ \alpha_j\right\}_{i,j=1}^{N,l} \tag{5}$$

Здесь $\tilde{\mathbf{f}}\left(\boldsymbol{\alpha}\right)$ - заданная $N-$мерная вектор-функция, структура которой зависит от выбора обобщенных координат и от геометрии манипулятора; $\tilde{\mathbf{F}}\left(\boldsymbol{\alpha}\right)$ - якобиан, имеющий максимальный ранг $\left(\min\left(l, N\right)\right)$.

При моделировании движений манипулятора, как основного элемента технологического процесса, необходимо учитывать как конструктивные особенности, так и упругую податливость звеньев. Эффективное управление упругими роботами возможно только за счет разработки специальных режимов управления, учитывающих влияние упругих свойств звеньев в процессе обслуживания $\left[1,5-8\right]$.

Движение манипулятора с целью обслуживания объектов (1) начинается в момент времени t_0 и заканчивается в момент T (T -может быть заданным или определяться из дополнительных условий).

Начиная с момента t_0 до T, манипулятор должен осуществлять встречи с объектами (1) в моменты времени $t_1, t_2, \cdots, t_k$, где t_i-момент встречи манипулятора с i-ымобъектом ($i = 1, 2, \cdots, \mathrm{k}$). Эти условия для переменных $\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}$ и $\mathbf{y}^i, \dot{\mathbf{y}}^i$, в общем случае, можно представить следующим образом

$$\left(\mathbf{q}(t_i), \dot{\mathbf{q}}^i(t_i), \mathbf{y}^i(t_i), \dot{\mathbf{y}}(t_i)\right) \in \mathbf{G}^i_{\mathrm{q},y} \left(i = 1,2,\cdots,k\right) \tag{6}$$

или, с учетом (5), для переменных $\boldsymbol{\alpha}^i$, $\dot{\boldsymbol{\alpha}}^i$ и $\mathbf{y}^i, \dot{\mathbf{y}}^i$ в виде

$$\left(\boldsymbol{\alpha}^i(t_i), \dot{\boldsymbol{\alpha}}^i(t_i), \mathbf{y}^i(t_i), \dot{\mathbf{y}}^i(t_i)\right) \in \mathbf{G}^i_{\alpha,y} \left(i = 1,2,\cdots,k\right) \tag{7}$$

Здесь $\mathbf{G}^i_{q,y}$ и $\mathbf{G}^i_{\alpha,y} \left(i = 1,2,\cdots,k\right)$-2(N+m) и $2(l+m)$ мерные области. Время нахождения манипулятора около каждого объекта не учитывается, то есть считается, что в момент времени t_i манипулятор обслуживает объект под номером i и мгновенно направляется к другому объекту (предположение правомерно поскольку $\tau/(T-t_0) \ll 1$, где τ-время нахождения манипулятора около объекта, а $\left(T-t_0\right)$ - время процесса обслуживания). То есть, момент времени $t_i \left(i = 1,2,\cdots,k\right)$ является началом движения манипулятора для обслуживания объекта под номером $\left(i+1\right)$. Условия (6) и (7) являются дополнительными требованиями к движению манипулятора и объектов. Возможны также и другие, совместные, требования, налагаемые как на параметры движения манипулятора и объектов обслуживания, так и на управляющие силы и моменты, развиваемые приводами. Эти требования формально можно представить в виде

$$\left(\boldsymbol{\alpha}^i(t_i), \dot{\boldsymbol{\alpha}}^i(t_i), \mathbf{y}^i(t_i), \dot{\mathbf{y}}^i(t_i), u^i\right) \in \mathbf{G}^i_{\alpha,y,u} \left(i = 1,2,\cdots,k\right) \tag{8}$$

Отметим, что если последовательность обслуживания манипулятором объектов фиксирована, то задача на каждом этапе движения $\left[t_{i-1}, t_i\right]$ сводится к обычной задаче управления или оптимального управления с фиксированными или свободными краевыми условиями $\left[9,10\right]$.Минимизирующий функционал на каждом этапе, можно представить в виде

$$I_i = I\left[t_i, t_{i+1}, \boldsymbol{\alpha}^i, \dot{\boldsymbol{\alpha}}^i, \mathbf{u}^i, \boldsymbol{\omega}^i\right] \to \min_{\mathbf{u}^i \in \{\mathbf{U}\}} \left(i = 0,1,2,\cdots,k-1\right) \tag{9}$$

В случае, когда последовательность обслуживания и время встреч с объектами не фиксированы, то первоначальную задачу управления можно сформулировать как задачу нахождения последовательности обслуживания объектов и время встреч и функционал (9) становится зависимым и от последовательности обслуживания объектов. С точки зрения технологического процесса немаловажным критерием качества является также рациональное использование технологического участка $(\mathbf{S} \to \min)$ $\left[3\right]$. Этот критерий является геометрическим и налагает дополнительное ограничение на параметры движения манипулятора.В $\left[3\right]$ рассматривается модель технологического процесса, состоящего из конвейеров, тележки с деталями и адаптивным манипулятором. Манипулятор оптимальным образом обеспечивает работу конвейеров нужными деталями, выбирая последовательность обслуживания с помощью датчика усилий, расположенного во внутренней поверхности захватного устройства.

Из (1), (3), (6)-(9) следует, что сформулированный процесс обслуживания можно рассматривать как результат целенаправленных управляемых движений составных динамических систем (1), (3) на интервалах времени $\left[t_{i-1}, t_i\right] \left(i = 1,2,\cdots,k\right)$ со следующими условиями преемственности между ними

$$\left(\boldsymbol{\alpha}^{\mathbf{i}}(\mathbf{t_i}), \dot{\boldsymbol{\alpha}}^{\mathbf{i}}(\mathbf{t_i}), \mathbf{y}^{\mathbf{i}}(\mathbf{t_i}), \dot{\mathbf{y}}^{\mathbf{i}}(\mathbf{t_i}), \boldsymbol{\alpha}^{\mathbf{i+1}}(\mathbf{t_i}), \dot{\boldsymbol{\alpha}}^{\mathbf{i+1}}(\mathbf{t_i})\right) \in \boldsymbol{\Phi}^i, \left(i = 1,2,\cdots,k\right) \tag{10}$$

Условие (10) означает, что в момент времени t_i конечное состояние $i-$ой динамической системы (1), (3) и начальное состояние $(i+1)$-ой системы (3) принадлежат некоторой $2(m+l)$ - мерной области $\mathbf{\Phi}^i\ (i=1,2,\cdots,k)$. С математической точки зрения (10) дает возможность рассматривать процесс обслуживания манипулятором технологического участка как управление движением манипулятора с переменной динамикой и с заданными промежуточными состояниями. В работах $[11,12]$ исследованы вопросы оптимального управления составных систем и определены условия оптимальности в задачах управления с промежуточными состояниями. Для эффективного исследования процесса обслуживания существенными являются как вопросы управляемости на отдельных этапах, так и управляемость всей системы в целом. В случае, когда движение манипулятора на каждом интервале обслуживания описывается линейными дифференциальными уравнениями с постоянными коэффициентами, а динамика движения объектов задана, методом математической индукции получены матрицы управляемости всей системы и условия вполне управляемости всего процесса обслуживания.

1. Черноусько Ф.Л., Градецкий В.Г., Болотник Н.Н. Манипуляционные роботы. М.: Наука, 1989, 363 с.
2. Динамика управления роботами. Под. Редакцией Е. И. Юревича. М.: Наука, 1984, 336 с.
3. Гукасян А.А. Об одной задаче оптимального моделирования технологического процесса, обслуживаемого манипуляционным роботом. Известия АН Арм. ССР, Механика, т.39, №6, 1986, с.39-49.
4. Гукасян А.А., Матевосян А.Г. Об управляемом движении материальной точки с нефиксированной массой. Известия НАН РА, Механика, №1, 2002, с.75-81.
5. Акуленко Л.Д., Болотник Н.Н. Синтез оптимального управления транспортными движениями манипуляционных роботов. Известия АН СССР, МТТ, №4, 1986, с.21-29.
6. Гукасян А.А. О кинематике многозвенного манипулятора с упругими соединительными узлами и с упругими звеньями. // Изв. НАН Армении. Механика. 2014. Т.67. №3.С.68-83.
7. Гукасян А.А. Кинематическое управление движением схвата двухзвенного упругого манипулятора. //Доклады НАН Армении. 2014. Т.114. № 4.С.316-324 .
8. Гукасян А.А. О пространственном положении и деформации упругих звеньев манипулятора. // Изв. НАН Армении. Механика. 2014. Т.67. №4.С.53-64.
9. Красовский Н.Н. Теория управления движением. М.: Наука, 1968, 475 с.
10. Ли Э.Б., Маркус Л. Основы теории оптимального управления. М.: Наука, 1972, 574 с.
11. Величенко В.В. Оптимальное управление составными системами. ДАН СССР, т.176, №4, 1967, с.754-756.
12. Величенко В.В. Условия оптимальности в задачах управления с промежуточными условиями. ДАН СССР, т.174, №5, 1967. с.1011-1013.

A.V. Rekhlov, D.A. Demidov, O.A. Shmakov

APPROACH TO DEVELOPMENT OF CONTROL SYSTEM FOR SMALL UAV

CRDI RTC, Saint-Petersburg
a.rekhlov@rtc.ru

Abstract

Results of flight time duration research among UAV with weight up to 500 are presented. Results of obstacle collision avoidance methods and resources research are presented. Approach to development of control system is proposed.

Keywords: small UAV, autonomous, navigation, cluttered environments, obstacle collision avoidance.

А.В. Рехлов, Д.А. Демидов, О.А. Шмаков

МЕТОДИКА РАЗРАБОТКИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ МИКРО И СРЕДНЕГО КЛАССОВ

ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург
a.rekhlov@rtc.ru

Аннотация

В статье представлены результаты исследования зависимости длительности полетного времени мультироторных БПЛА весом до 500 г от массы. Представлен результат анализа средств предотвращения столкновения БПЛА с препятствиями. Предложена методика разработки системы управления БПЛА.

Ключевые слова: малогабаритный БПЛА, автономный, навигация, замкнутое пространство, предотвращение столкновения с препятствиями.

Введение

Задачи автономной навигации малогабаритных беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в замкнутых пространствах, значительно ограничивающих возможные перемещения, а также избегания столкновений с подвижными и неподвижными предметами окружающей среды являются одними из актуальных задач современной робототехники. Несмотря на то, что каждая из этих задач в общем на сегодняшний день имеет решение, применительно к малогабаритным БПЛА с массой до 500г эти задачи все еще не решены, что связано с массогабаритными и энергетическими ограничениями, налагаемыми на состав бортового оборудования БПЛА. Это подтверждается результатами проведенного анализа зависимости полетного времени от массы БПЛА, в который вошли более 80 коммерчески доступных мультироторных БПЛА массой до 500 г. Полетное время без передачи видеосигнала с бортовых видеокамер для БПЛА массой до 130 г не превышает 10-11 мин, и 15-18 мин – для БПЛА с массой от 130 до 500 г (рис. 1). Размещение на борту дополнительного оборудования, необходимого для решения указанных задач, как правило ведет к снижению полетного времени на 30 – 50 %.

На сегодняшний день работы в области обеспечения автономности малогабаритных БПЛА связаны с поиском оптимальных средств и методов навигации и предотвращения столкновений, не требующих больших вычислительных и энергетических ресурсов, тяжелого сенсорного обеспечения.

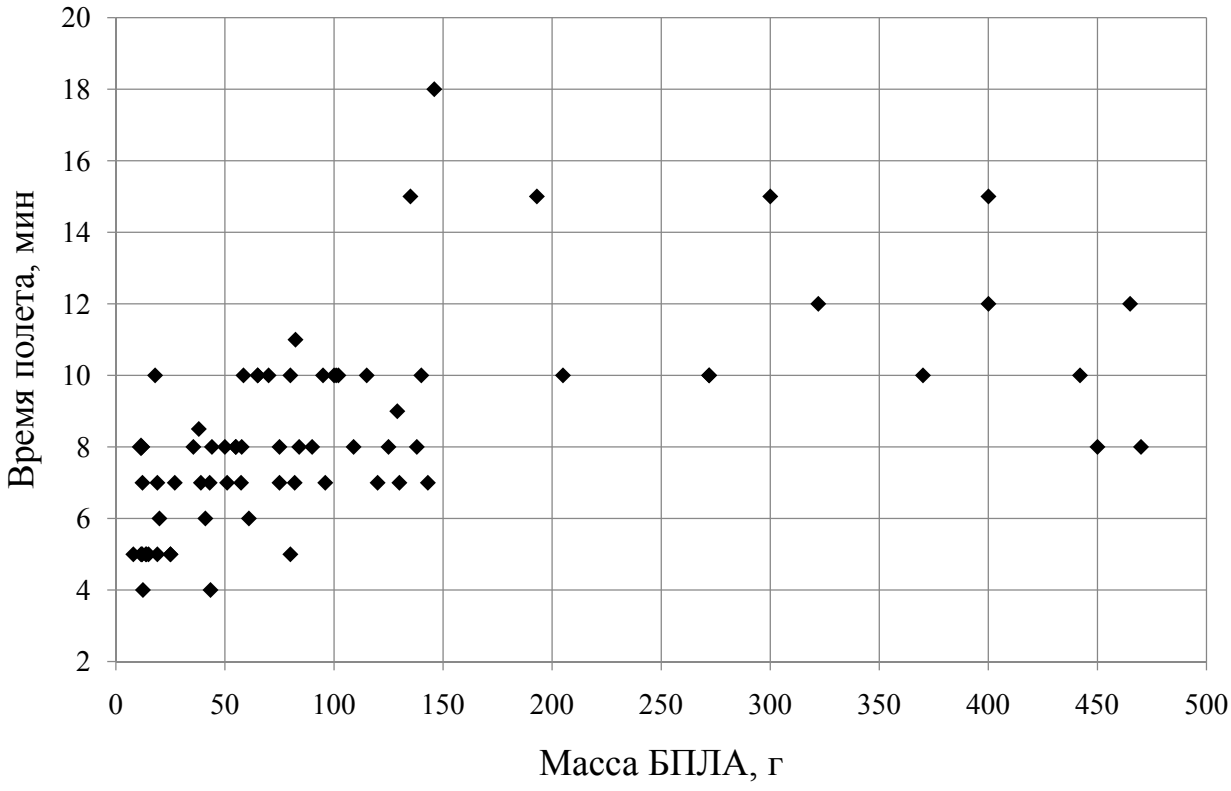


Рисунок 1 – Зависимость максимальной длительности полета БПЛА массой до 500 г без передачи видеосигнала с бортовых видеокамер

Постановка задачи

В рамках одной из работ, выполняемых в ЦНИИ РТК, поставлена задача разработки системы управления (СУ) БПЛА и макета БПЛА среднего класса со следующими техническими характеристиками:

- габариты макета БПЛА: не менее 100 х 100 х 100 мм и не более 800 х 800 х 500 мм;
- продолжительность полета – не менее 10 мин;
- высота полета – не менее 50 м.

СУ БПЛА должна обеспечивать:

- прием команд управления и передачу на пульт управления данных телеметрии и видеосигнала;
- передвижение БПЛА по предварительно введенному заданию, в том числе с использованием данных спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС/GPS;
- предотвращение столкновений с подвижными и неподвижными препятствиями;
- автоматический облет неподвижных объектов, а также движущихся со скоростью не более 5 км/ч;
- безопасное перемещение БПЛА в ограниченных пространствах, сравнимых с размерами БПЛА – в том числе каналах, шахтах, коридорах;
- приземление на ограниченную площадку размерами не более 1,0 х 1,0 м;
- возможность подключения модуля полезной нагрузки и управления им.

Целью данной работы является создание задела для разработки перспективных БПЛА и их миниатюризации, подготовки специалистов для их разработки, в частности:

- разработка СУ для БПЛА среднего и микро классов, позволяющей реализовывать задачи инспекции в замкнутых пространствах как в режиме удаленного управления по бортовой видеокамере, так и в автономном режиме, по показаниям систем глобального позиционирования, с автоматическими взлетом, посадкой и облетом препятствий;
- использование СУ и макета БПЛА в учебном процессе, для обучения студентов проектированию робототехнических систем, в рамках расширенных курсов проектирования робототехнических систем, микропроцессорной техники и теории автоматического управления.

Анализ средств избегания столкновений БПЛА с препятствиями

Анализ современных достижений в области разработки автономных БПЛА среднего и микро классов позволил выделить следующие группы способов избегания столкновений с подвижными и неподвижными предметами окружающей среды:

- С применением систем технического зрения (СТЗ) общего назначения на основе лидаров, TOF-камер глубины, стереоскопических и одиночных видеокамер, также применяемых для задач навигации и картографирования. В случае применения данного подхода на БПЛА весом до 200 г, вычислительное обеспечение методов СТЗ как правило располагается на наземной станции. При весе БПЛА свыше 400 г возможно размещение вычислителя на борту [1], что, однако, ведет к значительному сокращению времени полета.
- С применением СТЗ на основе видеокамер низкого разрешения. В работе [2] описана система оптической одометрии, в состав которой входят 8 специальным образом расположенных оптических сенсоров низким разрешения 30х30 пикселей и весом 0,65 г каждый, частота работы системы составляет 25 Гц. В работе [3] описан результат разработки БПЛА весом 20 г, на борту которого установлен модуль стереоскопической камеры глубины весом 4 г, в состав которого входят 2 видеокамеры разрешением 128х96 пикселей и микроконтроллер STM32F407, на котором был реализован предложенный авторами алгоритм построения карты глубины. Частота работы системы составила 11 Гц.
- С применением ультразвуковых и оптических дальномеров. Вес большинства таких датчиков превышает 4 г, а ширина диаграммы направленности (ДН) обуславливает необходимость установки не менее 10 датчиков для обеспечения детектирования препятствий в окружающем БПЛА пространстве, и суммарному весу сенсорной системы не менее 40 г.

Предполагаемая установка системы избегания столкновений на БПЛА как среднего, так и микро класса, исключает возможность ее реализации на основе СТЗ общего назначения. При реализации системы на основе СТЗ с применением видеокамер низкого разрешения, для безопасного перемещения БПЛА в замкнутых пространствах необходимо размещение по периметру БПЛА нескольких модулей, что также ведет к недопустимому увеличению веса, а низкая скорость работы системы ограничивает скорость перемещения БПЛА. В 2016 году компанией ST были выпущены оптические TOF-дальномеры инфракрасного диапазона VL53L0X в SMD корпусе. Ширина ДН датчика составляет 25°, дальномер обеспечивает измерение расстояния в диапазоне до 2 м с частотой от 5 до 50 Гц. В отличие от ультразвуковых и триангуляционных оптических дальномеров, для рассмотренных дальномеров отсутствует их взаимовлияние друг на друга при пересечении ДН, что обеспечивает стабильность результатов измерений при функционировании в замкнутом пространстве с переотражением

испускаемых датчиками сигналов. Вес измерительного модуля, разработанного на основе датчиков VL53L0, составляет 0,05 г, а шинный интерфейс связи позволяет значительно сократить количество проводки, необходимой для питания и коммуникации с датчиками.

На основании проведенного обзора, для реализации системы избегания столкновения с препятствиями и перемещения в ограниченном пространстве выбран вариант с применением массива дальномеров VL53L0X, как наиболее простой и требующий размещения на борту БПЛА сенсорного обеспечение с минимальным весом.

Методика разработки СУ БПЛА

Одним из широко применяемых подходов к разработке сложных систем управления, обработки сигналов и связи является модельно-ориентированное проектирование (МОП), реализующее V-образную модель разработки информационных систем, состоящую из 5 основных этапов [4]:

- Определение требований к системе в целом и ее отдельным частям;
- Моделирование системы и ее подсистем;
- Проектирование закона управления системой на основе разработанной модели;
- Реализация системы;
- Верификация и тестирование.

Основной задачей подхода является уменьшение сроков разработки и снижение рисков, и, как следствие, удешевление разработки, за счет своевременного планирования и последовательной детализации разрабатываемой системы при помощи моделей. Одним из основных недостатков метода является невысокая гибкость при возникновении факторов, не предусмотренных на этапе детализации, в том числе при изменении требований к системе, взаимодействия разработчика с независимыми субъектами внешней среды [5].

Концепция МОП, предложенная компанией Mathworks, позволяет повысить гибкость V-образной модели разработки, а для ее реализации предлагается использование пакетов Matlab и Simulink.

В связи с необходимостью применения результатов работы для обучения студентов, для разработки СУ БПЛА наиболее целесообразным мы считаем применение Matlab и Simulink, поскольку данный программный комплекс:

- является одним из наиболее широко применяемых при обучении и разработке СУ;
- имеет встроенные инструменты для реализации подхода МОП, что позволит наглядно продемонстрировать процесс разработки сложной СУ;
- позволяет разрабатывать компьютерные модели ОУ встроенными средствами, а также подключать КМ, разработанные в сторонних программных продуктах;
- имеет встроенный генератор кода, что позволяет преобразовать СУ, разработанную при помощи Matlab и Simulink, в код на языках C или C++, и использовать его в качестве управляющей программы на бортовом микроконтроллере ОУ, что также обеспечивает масштабируемость и портируемость разработанной СУ.

Для обеспечения системности процесса разработки и обучения, а также масштабируемости СУ для возможности применения на БПЛА различных классов, предлагается разбиение СУ на ряд взаимосвязанных уровней, в рамках каждого из которых может быть организован курс теоретических и практических занятий, за основу которых с учетом специфики работ, выполняемых в ЦНИИ РТК, могут быть взяты аналогичные курсы от Массачусетского Технологического Института [6], Дрексельского Университета [7] и Пенсильванского Университета [8]:

1) Управление ориентацией и перемещением БПЛА в пространстве.
2) Предотвращение столкновений с препятствиями.
3) Реализация систем автоматического и полуавтоматического облета препятствий, взлета и посадки, движения по заданной траектории при помощи систем глобального позиционирования;
4) Реализация методов оптической навигации и картографирования, алгоритмов маршрутизации.

Поскольку СУ должна обеспечивать функционирование БПЛА как среднего, так и микро классов в условиях жестких массогабаритных и энергетических ограничений, реализацию 1-3 уровней СУ предполагается осуществлять на базе микропроцессоров STM32. Для реализации 4 уровня СУ, макет БПЛА должен быть дополнительно оснащен одноплатным компьютером и средствами оптической навигации. Количество уровней СУ, размещаемых на борту БПЛА, может варьироваться в зависимости от массоэнергетических ограничений. В соответствии с концепцией МОП, основой для разработки СУ будет служить компьютерная модель БПЛА, что обеспечит платформонезависимость СУ, а также повысит гибкость учебного процесса, поскольку работы по разработке и предварительному тестированию системы не будут требовать наличия физического макета БПЛА.

Заключение

В ходе работы проведен поиск средств и методов навигации и избегания столкновений с препятствиями для БПЛА среднего и микро классов, определено сенсорное оснащение системы безопасности БПЛА. Предложена структура СУ БПЛА, обеспечивающая масштабирование СУ в зависимости грузоподъемности и габаритов БПЛА. Предложенный подход к организации процесса разработки позволяет создать задел для разработки перспективных БПЛА и их миниатюризации, а также использовать результаты разработки для подготовки специалистов для разработки СУ БПЛА.

1. QUADCLOUD: A Rapid Response Forcewith Quadrotor Teams / Montha K. et.al. // Experimental Robotics, Springer Tracts in Advanced Robotics – 2016. – pp. 577–590.
2. Briod A. A method for ego-motion estimation in micro-hovering platforms flying in very cluttered environments / Briod A., Zufferey J., Floreano D. // Auton Robot. – 2015. – 15p.
3. Autonomous Flight of a 20-gram Flapping Wing MAV with a 4-gramOnboard Stereo Vision System / Wagter C.De et. al. // Design, Aerodynamics, and Artificial Intelligence of a Flapping Wing Robot – 2016. – 6 p.
4. Модельно-ориентированное проектирование СУ [Электронный ресурс] / Н.П. Деменков // Режим доступа: |http://is.ifmo.ru/miscellaneous/_matlab_simulink.pdf.
5. Стандарт V-образной модели разработки систем [Электронный ресурс] // Режим доступа: http://ftp.uni-kl.de/pub/v-modell-xt/Release-1.1-eng/Dokumentation/pdf/V-Modell-XT-eng-Teil1.pdf.
6. Содержание курса разработки СУ БПЛА Массачустеского Технологического Института [Электронный ресурс] // Режим доступа: http://peris.mit.edu/1630/video/slides.pdf.
7. Репозиторий с материалами курса разработки СУ БПЛА Содержание курса разработки СУ БПЛА Дрексельского Университета [Электронный ресурс] // Режим доступа: https://github.com/dch33/Quad-Sim.
8. Курс разработки СУ роботов Пенсильванского Университета [Электронный ресурс] // Режим доступа: https://www.coursera.org/specializations/robotics.

E.S. Lomaev, A.B. Smirnov, A.V. Rogov

TWO-AXIS SYSTEM FOR DEFLECTION OF LASER BEAM

SPbPU,CRDI RTC, Saint-Petersburg
e.lomaev@rtc.ru

Abstract

This article describes primary applications of laser beam pointing deviation systems. Systems are categorized. The possibility of building such systems based on different physical effects (acousto-optical, electro-optical, piezoelectric) has been considered. Layout scheme for a two-coordinate laser beam pointing deviation system based on biomorphic piezoelectric elements is proposed.

Keywords: two-axis deflection system, laser beam, piezoelectric stripe actuators.

Е.С. Ломаев, А.Б. Смирнов, А.В. Рогов

ДВУХКООРДИНАТНЫЕ СИСТЕМЫ ОТКЛОНЕНИЯ ЛАЗЕРНОГО ЛУЧА

СПбПУ, ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург
e.lomaev@rtc.ru

Аннотация

В статье рассмотрены основные области применения систем отклонения лазерного луча, приведена их классификация. Рассмотрена возможность построения системы отклонения с использованием различных физических эффектов (акустооптическом, электрооптическом, пьезоэлектрическом). Предложена компоновочная схема двухкоординатной системы отклонения лазерного луча с использованием биморфных пьезоэлементов.

Ключевые слова: двухосевая система отклонения, лазерный луч, пьезоэлектрический биморфный актуатор.

Устройства, использующие лазерное излучение, получили широкое распространение в современных технических системах. Лазерная хирургия, сканирующие системы, лазерная обработка материалов, системы лазерной космической связи, вот лишь некоторые области применения лазерного излучения.

Несмотря на различия решаемых задач, все выше перечисленные области объединяют единые критерии, характеризующие качество системы отклонения лазерного луча (СОЛЛ), а именно: максимальный угол отклонения лазерного луча (ЛЛ), количество осей отклонения, разрешающая способность СОЛЛ и ее быстродействие.

На рисунке 1 приведена классификация СОЛЛ

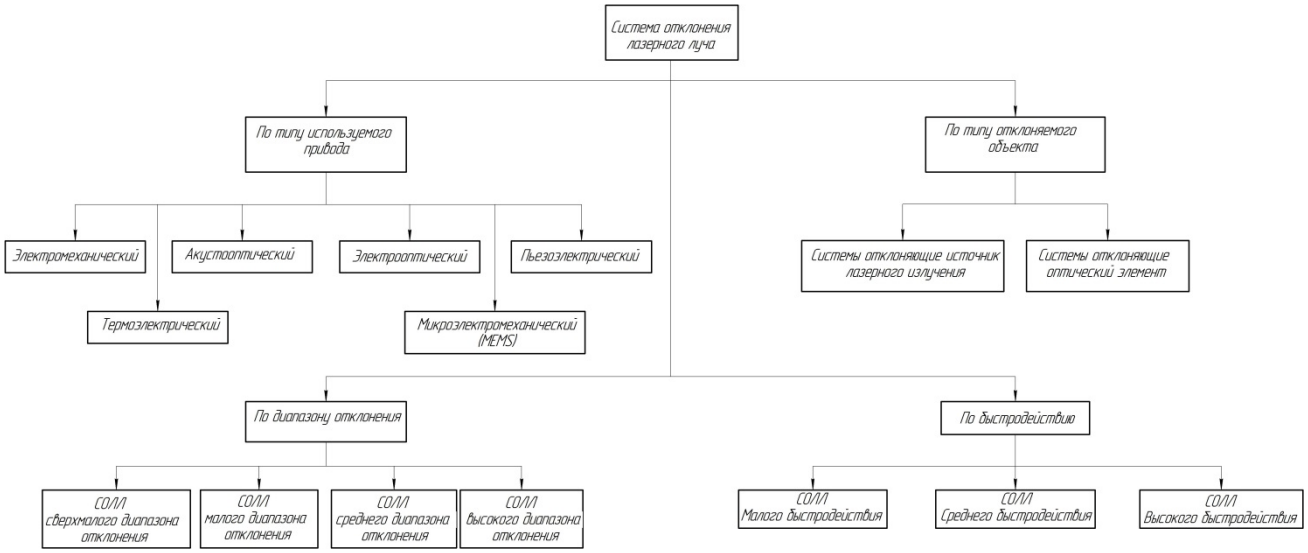


Рисунок 1 – Классификация СОЛЛ

Электромеханические СОЛЛ представляют собой одно- или двухкоординатную систему отклонения луча, в которой перемещение оптического устройства осуществляется посредством электродвигателя, который соединен с выходным звеном через механическую передачу (цилиндрическую зубчатую, коническую, планетарную и т.д.). Такие СОЛЛ имеют наиболее простую конструкцию, могут обладать высокими силомоментными характеристиками, что позволяет применять их в системах с высокой мощностью лазерного излучения с диапазоном отклонения луча до ±450. Однако электромеханические СОЛЛ обладают низким КПД, большим количеством нежелательных эффектов, снижающих точность СОЛЛ, большими габаритами, малым быстродействием.

Акустооптические и электрооптические СОЛЛ – системы в которых отклонения лазерного луча осуществляется при прохождении через материал, который меняет свои оптические свойства (рисунок 2) при акустическом ли электрическом воздействии. Такие СОЛЛ обладают высоким быстродействием, большей точностью и более высоким КПД чем электромеханические СОЛЛ, но имеют не высокий диапазон отклонения (порядка 5°).

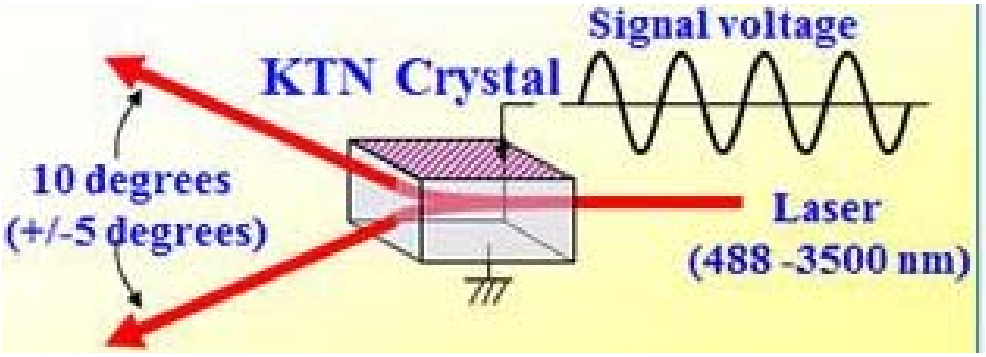


Рисунок 2 – Принцип действия электрооптической СОЛЛ [1]

Термоэлектрические и микроэлектромеханические СОЛЛ (рисунки 3, 4) – миниатюрные (размеры таких систем могут достигать 2 мм х 2 мм) системы, предназначенные для отклонения лазерного излучения в большом диапазоне углов (порядка 20°). Недостатком таких систем является неспособность передачи лазерного излучения большой мощности из-за перегрева зеркала вследствие малых габаритов.

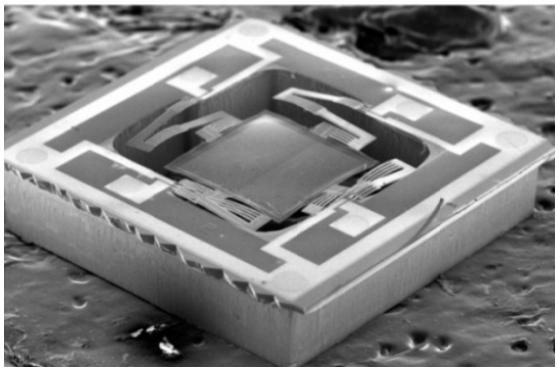


Рисунок 3 – Пример термоэлектрической СОЛЛ [2]

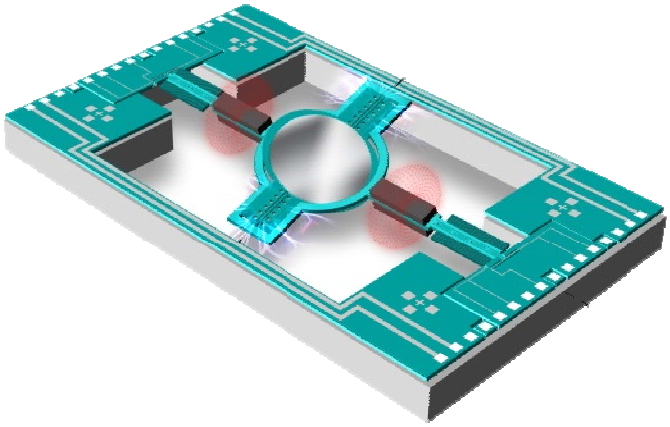


Рисунок 4 – Пример микроэлектромеханической СОЛЛ [3]

Пьезоэлектрические СОЛЛ получили широкое распространение благодаря отсутствию паразитных эффектов (люфт, трение), при высокой разрешающей способности (пьезоэлектрические СОЛЛ могут работать в субнанометровом диапазоне), а также благодаря высокому быстродействию (порядка нескольких миллисекунд).

На рисунке 5 представлен проектный облик СОЛЛ на базе биморфных пьезоэлементов.

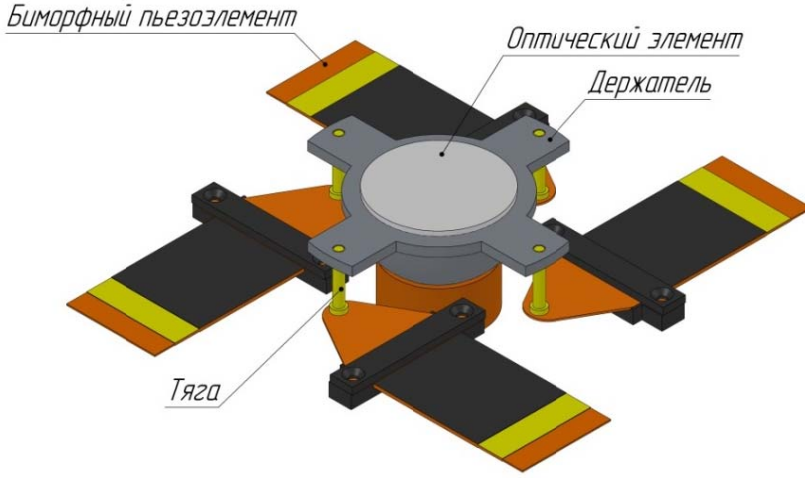


Рисунок 5 – Проектный облик СОЛЛ на базе биморфных пьезоэлементов

Дефлектор представляет собой двухстепенную упругую систему в которой отклонение луча осуществляется парой биморфных пьезоэлементов при помощи тяг, жестко связанных с держателем оптического элемента.

Габаритные размеры СОЛЛ на базе биморфных пьезоэлементов представлены на рисунке 6.

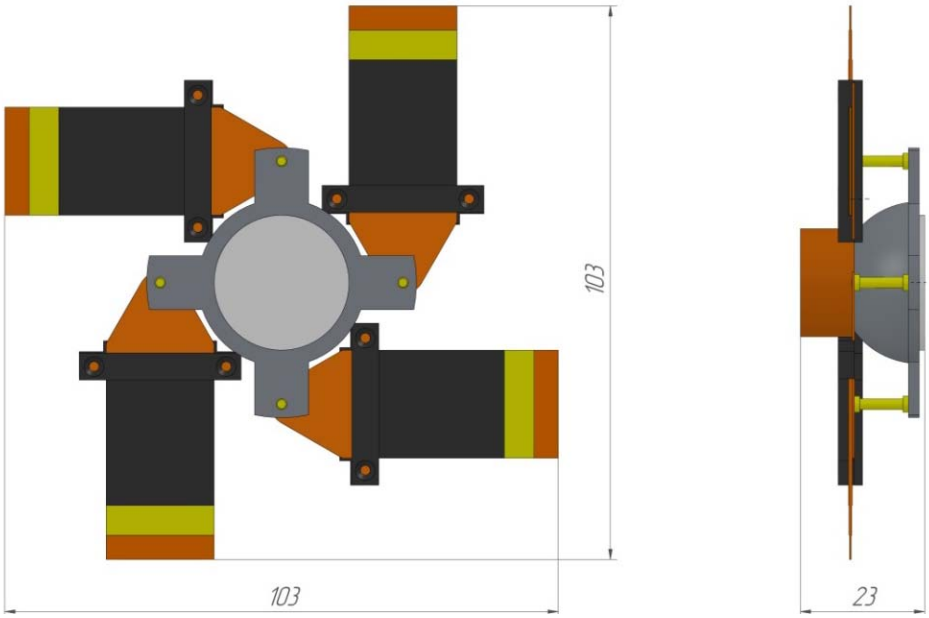


Рисунок 6 – Габаритные размеры СОЛЛ на базе биморфных пьезоэлементов

Отклонение оптического элемента по двум координатам осуществляется за счет подачи на парные биморфные пьезоэлементы электрического сигнала, сдвинутого по фазе на 1800. На рисунке 7 показан вариант реализации держателя, в котором оптический элемент закреплен внутри двухстепенной рамы.

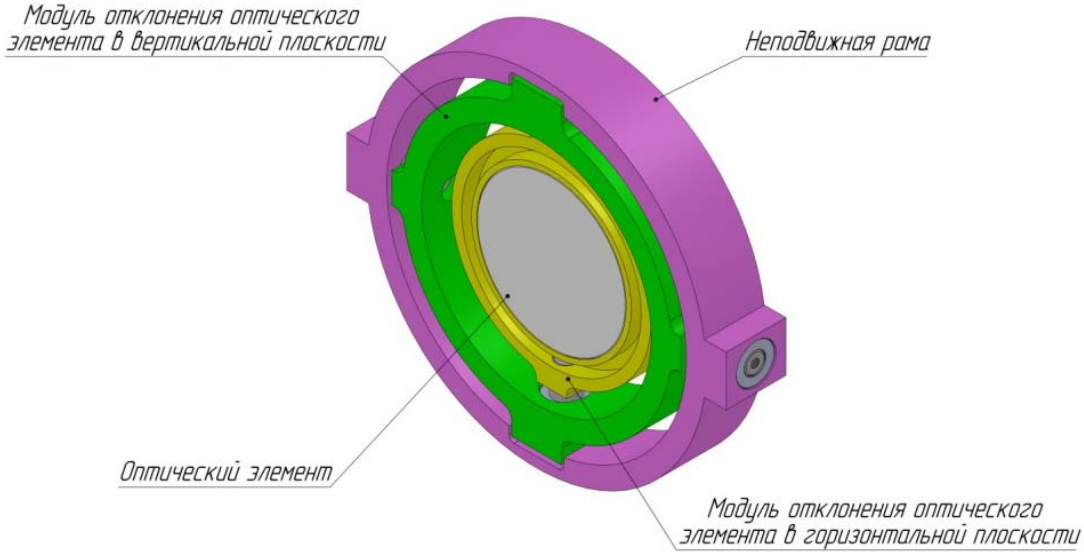


Рисунок 7 – Проектный облик держателя оптического элемента

При таком варианте биморфные пьезоэлементы попарно соединены тягами с модулями отклонения в горизонтальной и вертикальной плоскости соответсвенно.

Описанные выше варианты построения лазерного дефлектора обладают высокой точностью позиционирования лазерного луча, а также высокими динамическими характеристиками.

1. Официальный сайт компании AMSTechologies, режим доступа: http://www.amstechnologies.com/ (дата обращения 27.06.2016).
2. Zhang X., Zhou L., Xie H. A fast large-stroke electrothermal MEMS mirror based on Cu/W bimorph// Micromachines 2015, 6, 1876-1889.
3. Официальный сайт компании Maradin, режим доступа:http://www.maradin.co.il/ (дата обращения 27.06.2016).

E.Yu. Kolesnichenko[1], V.E. Pavlovsky[2]

EXPLICIT SYNTHESIS OF MOTION CONTROL OF WHEELED MECANUM-ROBOT ALONG THE CURVED TRAJECTORY

[1]ESC of intelligent robotics of RSUH, Laboratory Intelligence and Mechatronics of Keldysh Institute of Applied Mathematics (RAS); [2]Keldysh Institute of Applied Mathematics (RAS), Moscow
decstrela@mail.ru, vlpavl@mail.ru

Abstract

The paper considers a theoretical model of the multi-wheel mobile robot on mecanum-wheels. It also briefly discusses the hardware implementation. The main purpose of the work is synthesis of controlled machine movement along the curved trajectories. Mecanum-wheels (wheels with a series of rollers attached to their circumference that can move a vehicle in any direction) simplify the kinematic scheme of the machine because the vehicle doesn't need sophisticated steering mechanisms and drives. The vehicle fully preserves the control possibilities for curvilinear motion. This work shows ways of the machine control for different trajectories, which are given by splines.

Keywords: Mecanum-wheels, model of the robot with six mecanum-wheels,Spline-path of the general form.

1. Introduction

Mecanum-wheels were invented by Swedish engineer, Bengt Ilon. He owns the idea and U.S. patent on the structure. He came up with the idea [1] in 1973 being fellow at the Swedish company Mecanum AB. For this reason, these wheels are often called Swedish or Ilon wheels in foreign literature. Mecanum-wheels are one of the possible model of omni-wheels (wheels of omni-directional movement), but have some differences. The main difference is special rollers mounted on the rim at an angle (usually 45 degrees) to the axis and plane of the wheel. As a result, mecanum-wheel demonstrates a number of specific properties of complex mechanical nature. The very interesting and important one is movement at an angle to the plane of the wheel. The view of a mecanum-wheel is shown below in fig.1 (on the left).

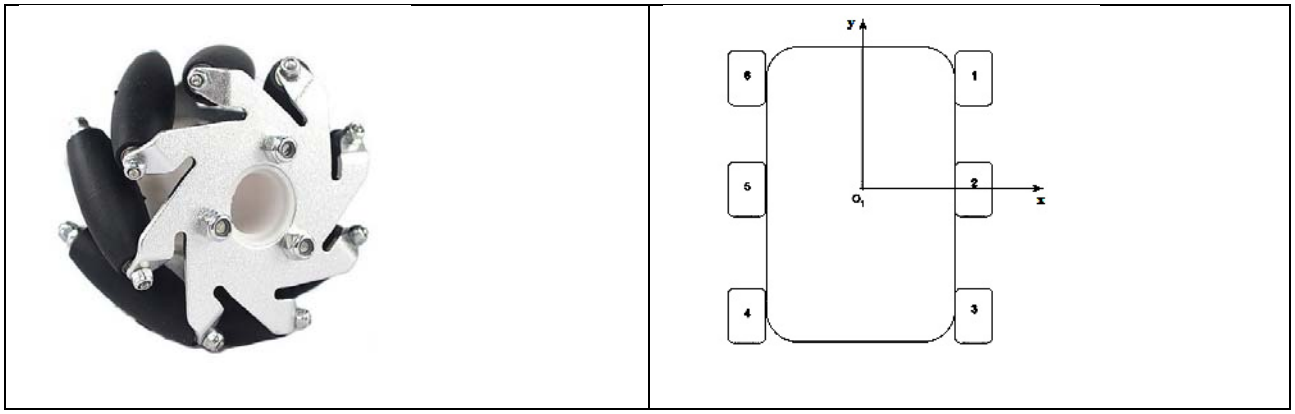


Figure 1– Standard design of wheel. (on the left).Six-wheeled robot with mecanum-wheels. (on the right)

The mobile robot with mecanum-wheels can moves on the plane (or slightly rough surface) in arbitrary direction without turns of the body (translationally) or with arbitrary turns. Thus the robot doesn't need sophisticated steering mechanisms and drives to provide a steering function. We can use the ability of mecanum-wheels moving in any direction. The robot with some mecanum-wheels need only to implement a different wheel speed [2-6]. In literature four-wheel devices generally were considered, here we will consider six-wheel one.

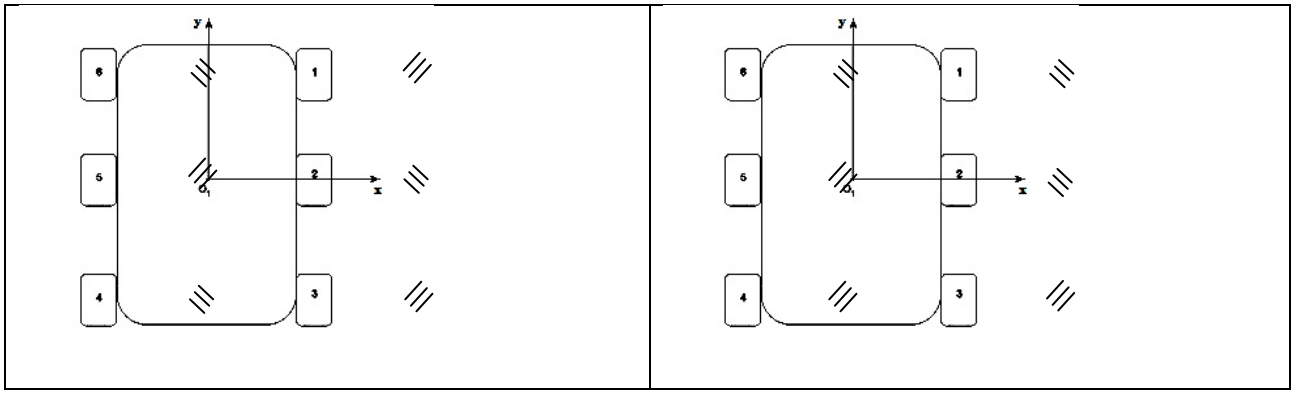


Figure 2 – Two main cases of mecanum-wheels disposition

2. Robot's model

We are going to consider a model of the robot with six mecanum-wheels. The wheels are believed to arrange in two rows along the sides of the rectangular body as shown in fig.1. It is important to note (see fig.1) that the mecanum-wheels mounted on the body can have different orientation – left and right orientation. The first and the main case that we consider is the symmetric configuration where the wheels 1,3,5 have the right orientation and the wheels 2,4,6 have the left one (see fig.2 on the left). The second case is the one where the wheels 1,2,6 have the right orientation and the wheels 3,4,5 have the left one (see fig.2 on the right). In total, there are 64 possible variants of the wheels disposition [6] that should be taken into consideration before implementing of the robot's construction.

3. Spline-path of the general form

Let's assume that the robot's system of control (routing system) chooses points at which the robot has to pass. Here is the explicit solution of the control problem.

Consider a few points at which the robot has to pass. To have smooth movement we build a path through the points with splines under the following conditions. The different polynomial functions have to agree in the value and in the first, the second and the third derivative at common points. That condition provides robot's smooth movement tangentially to the trajectory. In the problem, the spline interpolation of the fourth degree is enough.

Consider an example with 4 given points: *(x0,y0), (x1,y1), (x2,y2), (x3,y3)*. Connect the points with three spline-curves:

$$y = \begin{cases} y_1 = c_{14}x^4 + c_{13}x^3 + c_{12}x^2 + c_{11}x + c_{10}\ , & x_0 \le x < x_1\ , \\ y_2 = c_{24}x^4 + c_{23}x^3 + c_{22}x^2 + c_{21}x + c_{20}\ , & x_1 \le x < x_2\ , \\ y_3 = c_{34}x^4 + c_{33}x^3 + c_{32}x^2 + c_{31}x + c_{30}\ , & x_2 \le x < x_3\ . \end{cases} \quad (1)$$

Require the fulfillment of the following smoothness conditions (primes denote differentiation with respect to time of the corresponding order):

$$y_1(x_0) = y_0\ ,\ y_1(x_1) = y_1\ ,\ y_1'(x_0) = 0\ ,\ y_1''(x_0) = 0\ ,\ y_1'''(x_0) = 0\ ,\ y_1'(x_1) = y_2'(x_1)\ ,\ y_1''(x_1) = y_2''(x_1)\ ,$$
$$y_1'''(x_1) = y_2'''(x_1)\ ,\ y_2(x_1) = y_1\ ,\ y_2(x_2) = y_2\ ,\ y_2'(x_2) = y_3'(x_2)\ ,\ y_2''(x_2) = y_3''(x_2)\ ,\ y_2'''(x_2) = y_3'''(x_2)\ ,$$
$$y_3(x_2) = y_2\ ,\ y_3(x_3) = y_3\ .$$

All of the above conditions define the system of equations for coefficients c_{ij}. That system is conveniently written in the form:

$$\boldsymbol{A} \cdot \boldsymbol{c} = \boldsymbol{B}\ ,$$

where

$$\boldsymbol{c} = (c_{14}\ c_{13}\ c_{12}\ c_{11}\ c_{10}\ c_{24}\ c_{23}\ c_{22}\ c_{21}\ c_{20}\ c_{34}\ c_{33}\ c_{32}\ c_{31}\ c_{30})^T$$
$$\boldsymbol{B} = (y_0\ y_1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ y_1\ y_2\ 0\ 0\ 0\ y_2\ y_3)^T$$

$$A=\begin{pmatrix}
x_0^4 & x_0^3 & x_0^2 & x_0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
x_1^4 & x_1^3 & x_1^2 & x_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
4x_0^3 & 3x_0^2 & 2x_0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
12x_0^2 & 6x_0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
24x_0 & 6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
4x_1^3 & 3x_1^2 & 2x_1 & 1 & 0 & -4x_1^3 & -3x_1^2 & -2x^1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
12x_1^2 & 6x_1 & 2 & 0 & 0 & -12x_1^2 & -6x_1 & -2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
24x_1 & 6 & 0 & 0 & 0 & -24x_1 & -6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x_1^4 & x_1^3 & x_1^2 & x_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x_2^4 & x_2^3 & x_2^2 & x_2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4x_2^3 & 3x_2^2 & 2x_2 & 1 & 0 & -4x_2^3 & -3x_2^2 & -2x_2 & -1 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 12x_2^2 & 6x_2 & 2 & 0 & 0 & -12x_2^2 & -6x_2 & -2 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 24x_2^2 & 6 & 0 & 0 & 0 & -24x_2^3 & -6 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x_2^4 & x_2^3 & x_2^2 & x_2 & 1 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x_3^4 & x_3^3 & x_3^2 & x_3 & 1
\end{pmatrix}$$

Have found the solution $\boldsymbol{c}=\boldsymbol{A}^{-1}\boldsymbol{B}$, we have the specific trajectory for the robot. Let's obtain expressions of the angular velocities of the wheels for movement along such trajectory. We assume that initially the center of the robot is located at the point *(x0,y0)* and its longitudinal axis is parallel to the axis *Ox*. So for the parameterization *x=t, y=y(t)* we have the linear and angular velocities of the robot:

$$v_x=1,\quad v_y=\begin{cases}4c_{14}t^3+3c_{13}t^2+2c_{12}t+c_{11}, & x_0\le t<x_1,\\ 4c_{24}t^3+3c_{23}t^2+2c_{22}t+c_{21}, & x_1\le t<x_2,\\ 4c_{34}t^3+3c_{33}t^2+2c_{32}t+c_{31}, & x_2\le t<x_3.\end{cases}$$

$$\omega=kv=\begin{cases}\dfrac{12c_{14}t^2+6c_{13}t+2c_{12}}{1+(4c_{14}t^3+3c_{13}t^2+2c_{12}t+c_{11})^2}, & x_0\le t<x_1,\\ \dfrac{12c_{24}t^2+6c_{23}t+2c_{22}}{1+(4c_{24}t^3+3c_{23}t^2+2c_{22}t+c_{21})^2}, & x_1\le t<x_2,\\ \dfrac{12c_{34}t^2+6c_{33}t+2c_{32}}{1+(4c_{34}t^3+3c_{33}t^2+2c_{32}t+c_{31})^2}, & x_2\le t<x_3.\end{cases}$$

Note that in the last formula k is the algebraic (signed) curvature of the trajectory. The center of the robot moves along that path and its longitudinal axis moves tangentially to the trajectory. The linear and angular velocities of the robot are continuous functions due to the conditions on the coefficients c_{ij}.

Finally for the first disposition of the mecanum-wheels (see fig.2 on the left) the angular velocities of the wheels have the form:

$$q_1'=-\frac{1}{r}\left(v_x+v_y+(l/2-L/2)\,\omega\right),\quad q_2'=-\frac{1}{r}\left(-v_x+v_y+l/2\,\omega\right),$$
$$q_3'=-\frac{1}{r}\left(v_x+v_y+(l/2+L/2)\,\omega\right),\qquad(2)$$

$$q_4' = -\frac{1}{r}\left(-v_x + v_y - (l/2 + L/2)\,\omega\right),\quad q_5' = -\frac{1}{r}\left(v_x + v_y - l/2\,\omega\right),$$

$$q_6' = -\frac{1}{r}\left(-v_x + v_y - (l/2 - L/2)\,\omega\right),$$

and for the second disposition (see fig.2 on the right):

$$q_1' = -\frac{1}{r}\left(-v_x + v_y + (l/2 + L/2)\,\omega\right),\quad q_2' = -\frac{1}{r}\left(-v_x + v_y + l/2\,\omega\right),$$

$$q_3' = -\frac{1}{r}\left(v_x + v_y + (l/2 + L/2)\,\omega\right),$$

$$q_4' = -\frac{1}{r}\left(v_x + v_y - (l/2 - L/2)\,\omega\right),\quad q_5' = -\frac{1}{r}\left(v_x + v_y - l/2\,\omega\right),$$

$$q_6' = -\frac{1}{r}\left(-v_x + v_y - (l/2 - L/2)\,\omega\right),$$

As an example consider the points *(0,0), (1,2), (3,1), (5,5)*. After solving the system on the coefficients c_{ij}, we obtain:

$$c_{ij} = \left(2, 0, 0, 0, 0, -\frac{129}{16}, \frac{161}{4}, -\frac{483}{8}, \frac{161}{4}, -\frac{161}{16}, \frac{601}{8}, -958, \frac{17727}{4}, -8944, \frac{53825}{8}\right). \qquad (3)$$

Fig.3 shows the graph of the trajectory according to formulae (1) and (3) on the left. On the right fig.3 shows the graph of the angular velocity of the first wheel according to (2). The graphs of the angular velocity of the other wheels are similarly. On the trajectory, there are also the points specifying the path.

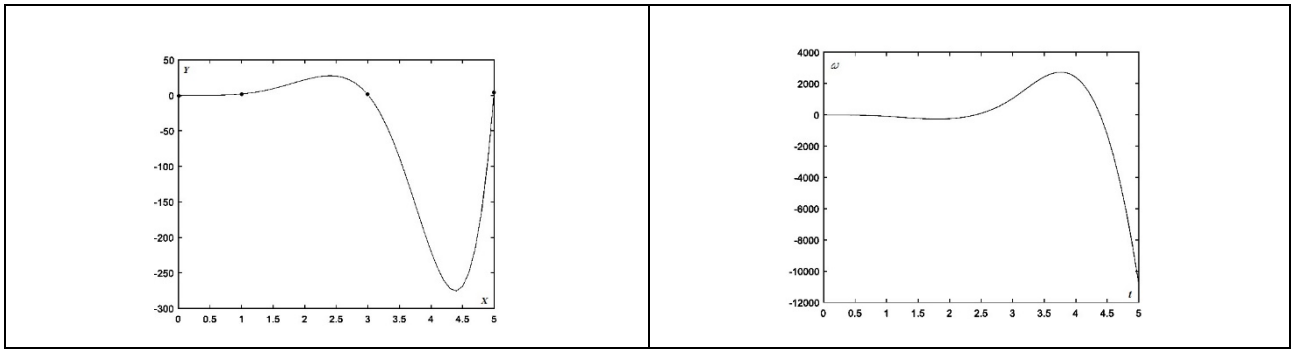


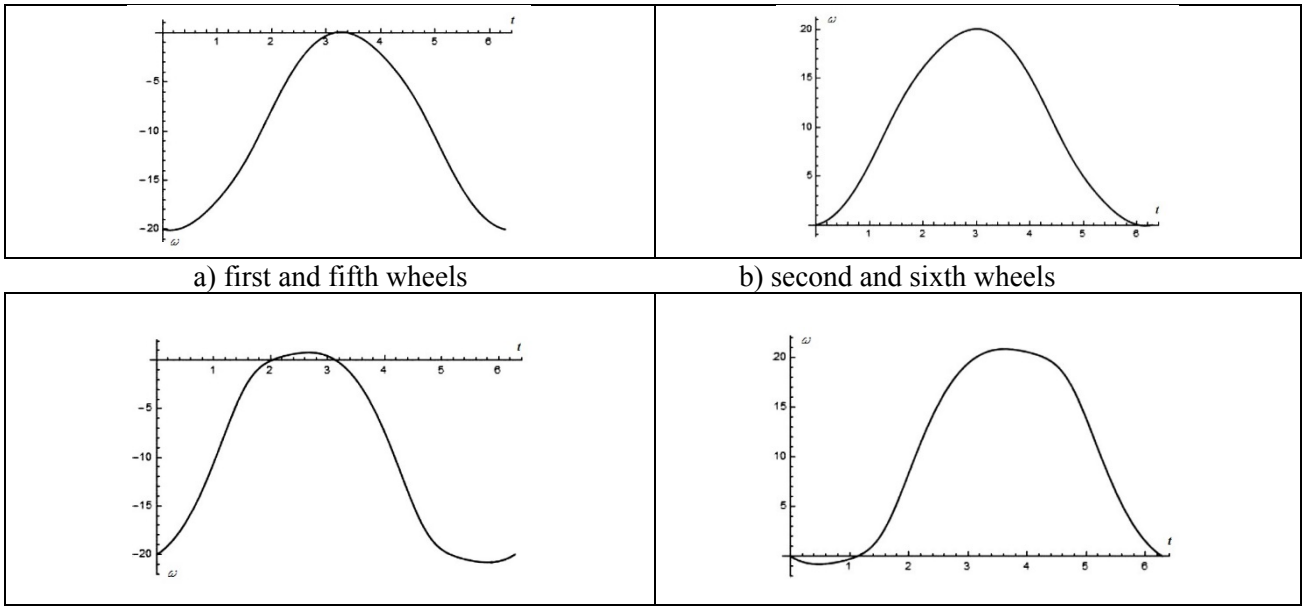
Figure 3 – Trajectory (on the left). The angular velocity of the first wheel (on the right) for r=0.1, l = 0.5, L=1.

The significant fluctuation of the trajectory («release») between the third and fourth points in fig.3 (on the left) is connected to the peculiarities of the spline approximation of the trajectory. However, the feature didn't affect the possibility of implementation of the robot's movement. The calculations show that the wheel speeds for the second disposition of the wheels are similar the ones for the first disposition (see fig.3 on the right).

Using those laws of the motion of the wheels, robot can move along rather complex trajectories with significant curvature turns. Every turn is realized without steering mechanisms.

Conclusion

Different motion and maneuvers of the robot were considered according to the proposed scheme. In particular, simple turns at different angles, movement on given trajectories like circles and sinuses ("snake") are studied. The robot's longitudinal axis was directed tangentially to the trajectory. For example, angular velocities of the wheels for "snake" motion are given in fig.4.



a) first and fifth wheels b) second and sixth wheels

c) third wheel d) fourth wheel

Figure 4 – The angular velocities of the wheels to drive on the “snake”

On each graph x-axis is time (s) and y-axis is the angular velocity (rad/s). The graphs show that angular velocities are similar one to another. There is difference only in the sign so the wheels rotate in opposite directions.

In all cases the advantages of the mecanum-construction are evident like in the above for movement along spline-curves.

Rather complex motion is also studied. The center of the robot moves on the given curve (e.g. straight line) and the body rotates by the given way about the z-axis through the center. Such motion can be named as “waltzing”. It turns out that that motion is easy realized by corresponding control of the angular velocities.

We came to conclusion that mecanum-construction of the wheeled mobile robot can be a good alternative to traditional mobile schemes in cases of high maneuver capability in cramped conditions. Such examples have already appeared [5].

1. Ilon B. Wheels for a course stable selfpropelling vehicle movable in any desired direction on the ground or some other base. Patent USA, 3876255, 1974 .
2. L. Lin and H. Shih. Modeling and Adaptive Control of an Omni-Mecanum-Wheeled Robot. IntelligentControl and Automation, Vol. 4 No. 2, 2013, pp. 166-179.
3. Hamid Taheri, Bing Qiao and Nurallah Ghaeminezhad. Kinematic Model of a Four Mecanum Wheeled Mobile Robot. International Journal of Computer Applications 113(3):6-9, March 2015
4. Gfrerrer, A. Geometry and kinematics of the Mecanum wheel. Comput. Aided Geom. Design 25 (2008), no. 9, 784-791.
5. KUKA Roboter GmbH KUKA OMNIMOVE [Electronic resource] — Access mode: http://www.kuka-omnimove.com/en/
6. E.Yu. Baranova, V.E. Pavlovsky. Kinematics of the six-wheeled mecanum-robot. // Izvestia VSTU,Actual problems of computers and informatics in engineering systems control. - Volgograd, 2015. – № 13 (177). - p. 147-152. (inrussian)

Е.Ю. Колесниченко[1], В.Е. Павловский[2]

ЯВНЫЙ СИНТЕЗ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ КОЛЕСНОГО МЕКАНУМ-РОБОТА ПО КРИВОЛИНЕЙНОЙ ТРАЕКТОРИИ

[1]УНЦ интеллектуальной робототехники РГГУ, Лаборатория «Интеллект и Мехатроника» ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, Москва, [2] ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, Москва, decstrela@mail.ru, vlpavl@mail.ru

Аннотация

В работе рассматривается теоретико-механическая модель многоколесного мобильного робота на меканум-колесах, кратко обсуждаются вопросы ее аппаратной реализации. Основная цель работы – синтез

управляемого движения аппарата по криволинейным траекториям. Использование меканум-колес (роликонесущих колес всенаправленного движения) упрощает кинематическую схему аппарата за счет отказа от сложных рулевых механизмов и приводов, и при этом полностью сохраняет возможности управления криволинейными движениями. В работе показаны способы управления аппаратом по различным траекториям при их сплайновом задании.

Ключевые слова: меканум-колеса, модель шестиколесного меканум-робота, Сплайн-траектории общего вида.

1. Введение

Меканум-колеса были изобретены шведским инженером Бенгтом Эрландом Айлоном, которому принадлежат идея и патент США на эту конструкцию. Он придумал идею [1] в 1973 г., когда был сотрудником в шведской компании Mecanum AB. По этой причине эти колеса в зарубежной литературе часто называют шведскими колесами или колесами Айлона. Меканум-колеса являются одной из возможных моделей омни-колес (колес всенаправленного движения), но имеют ряд отличий, главным из которых является использование специальных роликов, установленных на ободе под углом (обычно 45 град.) к оси и плоскости колеса. В результате меканум-колесо демонстрирует ряд специфических свойств сложной механической природы, среди которых весьма интересное и важное — движение под углом к плоскости колеса. Вид меканум-колеса приведен ниже на рис.1 (слева).

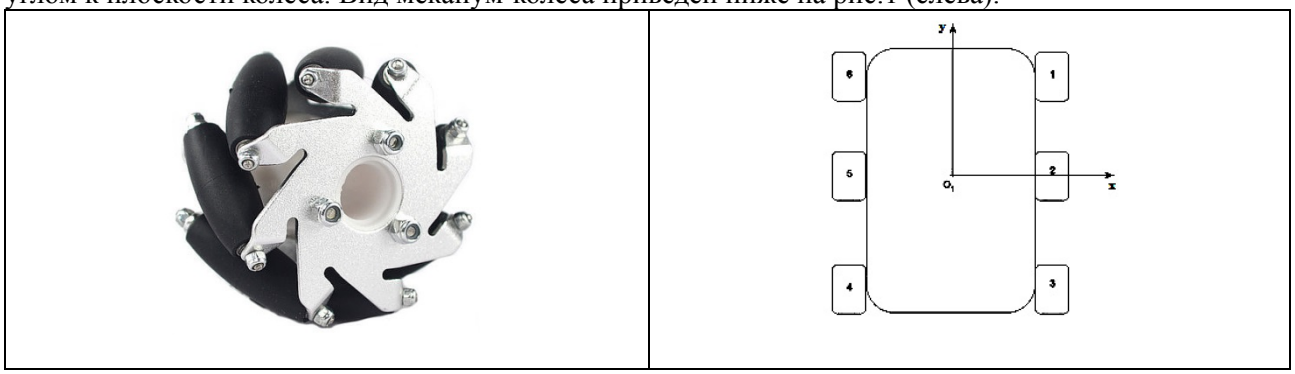


Рисунок 1 –Типовая конструкция меканум-колеса. (слева).
Шестиколесный робот с меканум-колесами (справа)

Мобильный робот с меканум-колесами может двигаться по плоскости (или слабо неровной поверхности) в произвольном направлении без поворотов корпуса (поступательно) или при произвольных поворотах. А тем самым можно не встраивать в робот сложные рулевые механизмы и приводы и обеспечивать рулевую функцию робота за счет использования способности меканум-колес двигаться в произвольном направлении. Аппарат, имеющий несколько меканум-колес, должен лишь реализовать необходимую различную скорость вращения колес [2-6]. В литературе в основном рассматривались четырехколесные аппараты, здесь рассмотрим шестиколесные.

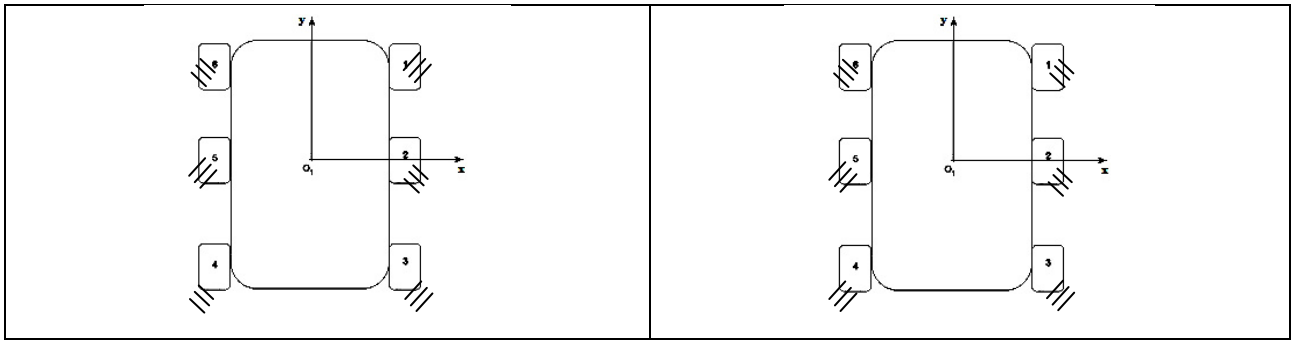


Рисунок 2 – Два основных варианта расположения меканум-колес

2. Модель робота

Будем рассматривать модель шестиколесного меканум-робота, и будем считать, что колеса расположены в два ряда вдоль сторон прямоугольного корпуса, так, как показано на рис.1. При этом важно отметить, что согласно рис.1 меканум-колеса могут иметь при монтаже на корпус разную ориентацию – правую и левую. В качестве первого, основного, варианта будем рассматривать симметричную конфигурацию, в которой колеса 1,3,5 являются правыми, а колеса 2,4,6 – левыми (см. рис.2 слева). Вторым вариантом будем рассматривать такой, в котором колеса 1,2,6 – правые, колеса 3,4,5 – левые (см. рис.2 справа). Отметим, что всего возможно 64 разных варианта компоновки колес

[6], что должно учитываться при реализации конструкции робота.

3. Сплайн-траектории общего вида

Предположим, что система управления робота (система маршрутизации) выбирает точки, по которым должен проезжать робот. Приведем явное решение задачи управления.

Пусть задано несколько точек, через которые должен проехать робот. Чтобы его движение было гладким, сначала построим путь через данные точки с помощью сплайнов так, чтобы в точках, где стыкуются различные полиномиальные функции, они совпадали по значению, по первой, второй и третьей производной. Это условие обеспечит гладкое движение робота по касательной к траектории. При этом в такой постановке задачи достаточно интерполяции сплайнами четвертой степени.

Рассмотрим пример с 4 заданными точками: *(x0,y0), (x1,y1), (x2,y2), (x3,y3)*. Точки соединим тремя сплайн-кривыми:

$$y = \begin{cases} y_1 = c_{14}x^4 + c_{13}x^3 + c_{12}x^2 + c_{11}x + c_{10}\ , & x_0 \le x < x_1\ , \\ y_2 = c_{24}x^4 + c_{23}x^3 + c_{22}x^2 + c_{21}x + c_{20}\ , & x_1 \le x < x_2\ , \\ y_3 = c_{34}x^4 + c_{33}x^3 + c_{32}x^2 + c_{31}x + c_{30}\ , & x_2 \le x < x_3\ . \end{cases} \quad (1)$$

Потребуем выполнения следующих условий гладкости (штрихами обозначены производные по времени соответствующего порядка):

$$y_1(x_0) = y_0\ ,\ y_1(x_1) = y_1\ ,\ y_1'(x_0) = 0\ ,\ y_1''(x_0) = 0\ ,\ y_1'''(x_0) = 0\ ,\ y_1'(x_1) = y_2'(x_1)\ ,\ y_1''(x_1) = y_2''(x_1)\ ,$$
$$y_1'''(x_1) = y_2'''(x_1)\ ,\ y_2(x_1) = y_1\ ,\ y_2(x_2) = y_2\ ,\ y_2'(x_2) = y_3'(x_2)\ ,\ y_2''(x_2) = y_3''(x_2)\ ,\ y_2'''(x_2) = y_3'''(x_2)\ ,$$
$$y_3(x_2) = y_2\ ,\ y_3(x_3) = y_3\ .$$

Все вышеперечисленные условия задают систему уравнений на полиномиальные коэффициенты c_{ij}. Эту систему удобно записать в следующем виде:

$$\boldsymbol{A} \cdot \boldsymbol{c} = \boldsymbol{B}\ ,$$

где

$$\boldsymbol{c} = (c_{14}\ c_{13}\ c_{12}\ c_{11}\ c_{10}\ c_{24}\ c_{23}\ c_{22}\ c_{21}\ c_{20}\ c_{34}\ c_{33}\ c_{32}\ c_{31}\ c_{30})^T$$

$$\boldsymbol{B} = (y_0\ y_1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ y_1\ y_2\ \ 0\ 0\ 0\ \ y_2\ y_3)^T$$

$$A = \begin{pmatrix}
x_0^4 & x_0^3 & x_0^2 & x_0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
x_1^4 & x_1^3 & x_1^2 & x_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
4x_0^3 & 3x_0^2 & 2x_0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
12x_0^2 & 6x_0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
24x_0 & 6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
4x_1^3 & 3x_1^2 & 2x_1 & 1 & 0 & -4x_1^3 & -3x_1^2 & -2x^1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
12x_1^2 & 6x_1 & 2 & 0 & 0 & -12x_1^2 & -6x_1 & -2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
24x_1 & 6 & 0 & 0 & 0 & -24x_1 & -6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x_1^4 & x_1^3 & x_1^2 & x_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x_2^4 & x_2^3 & x_2^2 & x_2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4x_2^3 & 3x_2^2 & 2x_2 & 1 & 0 & -4x_2^3 & -3x_2^2 & -2x_2 & -1 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 12x_2^2 & 6x_2 & 2 & 0 & 0 & -12x_2^2 & -6x_2 & -2 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 24x_2^2 & 6 & 0 & 0 & 0 & -24x_2^3 & -6 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x_2^4 & x_2^3 & x_2^2 & x_2 & 1 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x_3^4 & x_3^3 & x_3^2 & x_3 & 1
\end{pmatrix}$$

После нахождения решения $\boldsymbol{c} = \boldsymbol{A}^{-1}\boldsymbol{B}$ будет получена уже конкретная траектория для робота. Найдем выражения для угловых скоростей колес для движения по такой траектории. Предполагая, что изначально центр робота находится в точке *(x0,y0)* и своей продольной осью робот направлен параллельно оси *Ox*, имеем при параметризации *x=t, y=y(t)* для линейной и угловой скоростей робота:

$$v_x = 1, \quad v_y = \begin{cases} 4c_{14}t^3 + 3c_{13}t^2 + 2c_{12}t + c_{11}, & x_0 \le t < x_1, \\ 4c_{24}t^3 + 3c_{23}t^2 + 2c_{22}t + c_{21}, & x_1 \le t < x_2, \\ 4c_{34}t^3 + 3c_{33}t^2 + 2c_{32}t + c_{31}, & x_2 \le t < x_3. \end{cases}$$

$$\omega = kv = \begin{cases} \dfrac{12c_{14}t^2 + 6c_{13}t + 2c_{12}}{1 + (4c_{14}t^3 + 3c_{13}t^2 + 2c_{12}t + c_{11})^2}, & x_0 \le t < x_1, \\ \dfrac{12c_{24}t^2 + 6c_{23}t + 2c_{22}}{1 + (4c_{24}t^3 + 3c_{23}t^2 + 2c_{22}t + c_{21})^2}, & x_1 \le t < x_2, \\ \dfrac{12c_{34}t^2 + 6c_{33}t + 2c_{32}}{1 + (4c_{34}t^3 + 3c_{33}t^2 + 2c_{32}t + c_{31})^2}, & x_2 \le t < x_3. \end{cases}$$

Заметим, в последней формуле k – это алгебраическая (со знаком) кривизна траектории, по которой движется центр робота и начало связанной с его корпусом системы координат. Заметим также, что линейная и угловая скорости робота являются непрерывными функциями в силу наложенных условий на коэффициенты c_{ij}. Здесь и далее принято, что при движении продольная ось корпуса робота движется по касательной к траектории его центра.

Окончательно, для первого варианта расположения меканум-колес (см. рис.2 слева) угловые скорости колес имеют вид:

$$q_1' = -\frac{1}{r}\left(v_x + v_y + (l/2 - L/2)\,\omega\right), \quad q_2' = -\frac{1}{r}\left(-v_x + v_y + l/2\,\omega\right),$$
$$q_3' = -\frac{1}{r}\left(v_x + v_y + (l/2 + L/2)\,\omega\right), \qquad (2)$$
$$q_4' = -\frac{1}{r}\left(-v_x + v_y - (l/2 + L/2)\,\omega\right), \quad q_5' = -\frac{1}{r}\left(v_x + v_y - l/2\,\omega\right),$$
$$q_6' = -\frac{1}{r}\left(-v_x + v_y - (l/2 - L/2)\,\omega\right),$$

для второго варианта (см. рис.2 справа):

$$q_1' = -\frac{1}{r}\left(-v_x + v_y + (l/2 + L/2)\,\omega\right), \quad q_2' = -\frac{1}{r}\left(-v_x + v_y + l/2\,\omega\right),$$
$$q_3' = -\frac{1}{r}\left(v_x + v_y + (l/2 + L/2)\,\omega\right),$$
$$q_4' = -\frac{1}{r}\left(v_x + v_y - (l/2 - L/2)\,\omega\right), \quad q_5' = -\frac{1}{r}\left(v_x + v_y - l/2\,\omega\right),$$
$$q_6' = -\frac{1}{r}\left(-v_x + v_y - (l/2 - L/2)\,\omega\right),$$

В качестве примера рассмотрим случай, когда роботу требуется проехать через точки *(0,0), (1,2), (3,1), (5,5)*. Решая систему на коэффициенты c_{ij}, получаем:

$$c_{ij} = \left(2, 0, 0, 0, 0, -\frac{129}{16}, \frac{161}{4}, -\frac{483}{8}, \frac{161}{4}, -\frac{161}{16}, \frac{601}{8}, -958, \frac{17727}{4}, -8944, \frac{53825}{8}\right), \qquad (3)$$

соответствующие графики приведены на рис.3, на левом – траектория согласно (1) и (3), на правом – график угловой скорости вращения первого колеса (2), графики угловых скоростей остальных колес робота аналогичны. На графике траектории показаны также точки, задающие построенную траекторию.

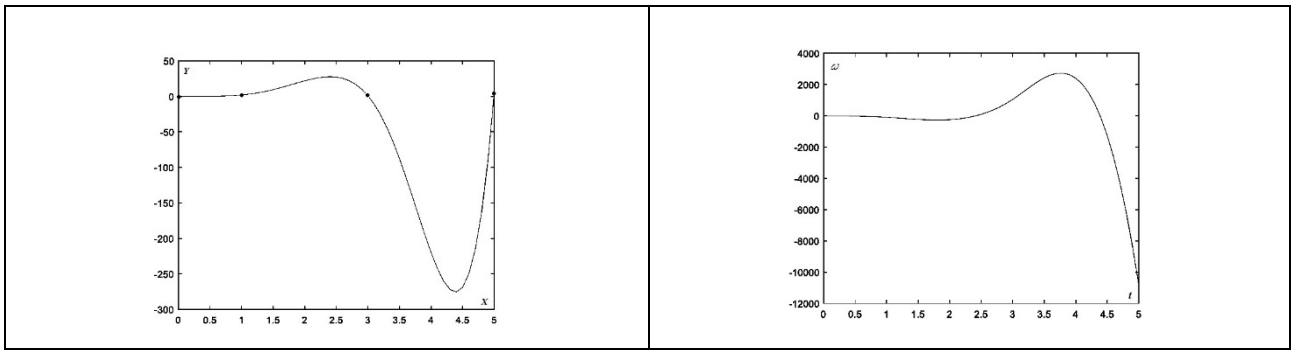


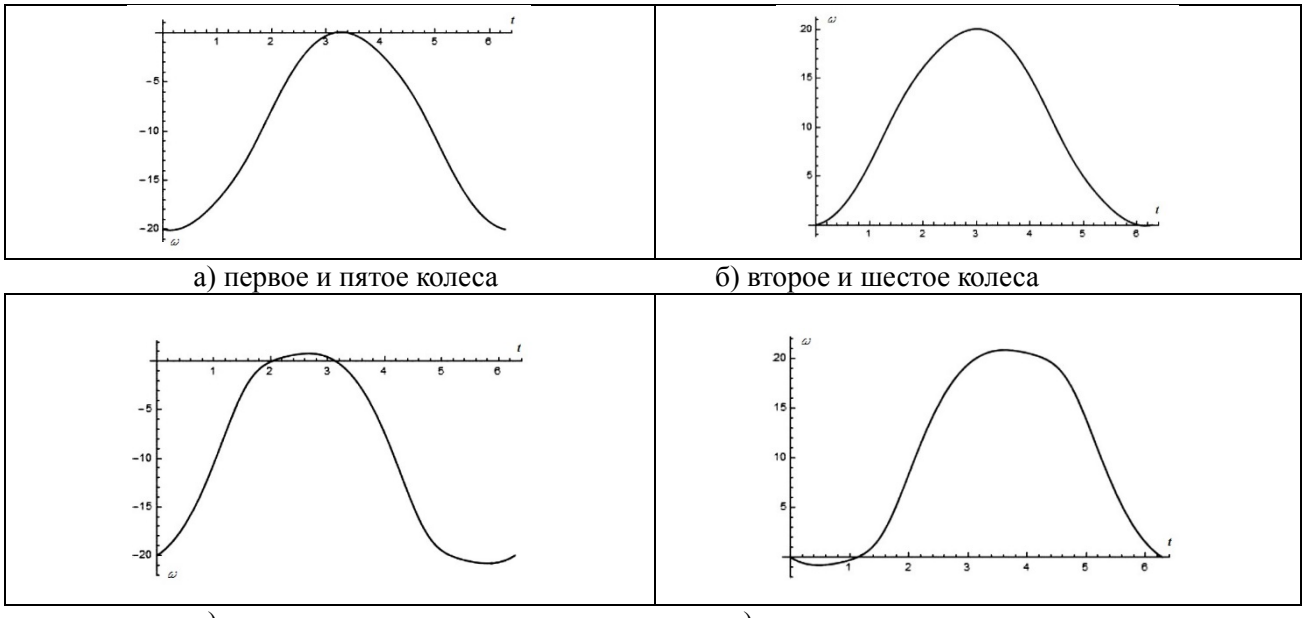
Рисунок 3 – Траектория (слева). Угловая скорость вращения первого колеса (справа) при выбранных параметрах r=0.1, l= 0.5, L=1

Заметим, что существенное колебание траектории («выброс») между 3-ей и 4-ой определяющими точками на рис.3 (слева) связано с особенностями сплайновой аппроксимации траектории, но эта особенность не повлияла на возможность реализации движения робота. Расчеты показывают также, что скорости колес для второго варианта компоновки колес на роботе аналогичны скоростям первого варианта и описываются близкими к рис.3 функциями и графиками.

Реализуя указанные законы движения колес, робот способен двигаться по достаточно сложным траекториям, с поворотами значительной кривизны, и все повороты реализуются без использования рулевых механизмов на роботе.

Заключение

По предложенной схеме рассмотрены различные движения и маневры робота, простые и достаточно сложные. Рассмотрены простые повороты на различные углы, рассмотрены движения по заданным траекториям типа окружностей, или синусоидальным траекториям (задача "змейка"). Робот осуществлял движение так, что продольная ось корпуса была направлена по касательной к траектории движения. Для примера скорости вращения колес по "змейке" приведены на рис.4.



а) первое и пятое колеса б) второе и шестое колеса

в) третье колесо г) четвертое колесо

Рисунок 4 – Скорости вращения колес для движения по «змейке»

Заметим, что на всех графиках оси абсцисс – это время в секундах, оси ординат – угловые скорости колес в (рад/сек). Из графиков видно, что скорости пар колес «первое-пятое» и «второе-

шестое» и третьего и четвертого колес в значительной степени аналогичны и отличаются фактически только знаками, т.е. указанные колеса вращаются в противоположные стороны.

Во всех случаях преимущества меканум-конструкции были очевидны, как и в рассмотренном выше случае движения по сплайн-кривым.

Рассмотрено также достаточно сложное движение, которое можно назвать "вальсирующим", в нем центр корпуса робота движется по заданной кривой, например, по прямой, а корпус вращается заданным образом вокруг оси, проходящей через центр корпуса ортогонально плоскости корпуса. Оказалось, что и такое движение просто реализуется соответствующим управлением скоростями вращения колес.

Сказанное приводит к выводу, что меканум-конструкция колесного мобильного робота может оказаться удачной альтернативой традиционным мобильным схемам в условиях, когда необходимо обеспечить высокую маневренность робота в стесненных условиях. Примерыэтогоужепоявляются, например, в [5].

1. Ilon B. Wheels for a course stable selfpropelling vehicle movable in any desired direction on the ground or some other base. Patent USA, 3876255, 1974.
2. L. Lin and H. Shih. Modeling and Adaptive Control of an Omni-Mecanum-Wheeled Robot. Intelligent Control and Automation, Vol. 4 No. 2, 2013, pp. 166-179.
3. Hamid Taheri, Bing Qiao and Nurallah Ghaeminezhad. Kinematic Model of a Four Mecanum Wheeled Mobile Robot. International Journal of Computer Applications 113(3):6-9, March 2015
4. Gfrerrer, A. Geometry and kinematics of the Mecanum wheel. Comput. Aided Geom. Design 25 (2008),
   no. 9, 784-791.
5. KUKA Roboter GmbH KUKA OMNIMOVE [Электронныйресурс] —Режимдоступа: http://www.kuka-omnimove.com/en/
6. Е.Ю.Баранова, В.Е.Павловский. Кинематика шестиколесного меканум-робота. // Известия ВолгГТУ, серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах». - Волгоград, 2015. - № 13 (177). - с. 147-152.

K.I. Kiy

SYSTEM FOR COMPLEX ANALYSIS OF ROAD SCENES FOR NAVIGATION OF AN AUTONOMOUS ROBOT ON ROADS

Keldysh Institute of Applied Mathematics of RAS, Moscow
kikip_46@mail.ru

Abstract

In this paper, a system for complex analysis of road scenes, based on color TV vision, is described. The main principles of developing vision algorithms and the whole system are also presented. Results of programming experiments with video sequences taken from vehicles in motion are provided.

Keywords: computer vision, image understanding, autonomous road following.

Introduction

During recent years there have been tremendous achievements in designing robots-vehicles for riding on roads of common use. Many leading car manufactures have prototypes of robots-vehicles. In particular Daimler, Google and other corporations have and test advanced prototypes of robot-vehicles. Google-vehicle regularly goes on roads, and reports about these rides can be found in [1]. In connection with the promotion of the developments in this field, numerous problems for computer vision have arisen. There have been several different approaches to solving these problems. During the last decade methods of learning and designing classifies, designed for solving strictly determined problems (road, road marking, other participants of the traffic, pedestrians, etc.), have come in the forefront. Since the vehicle has to move under strongly changing external conditions (especially it is typical for climate zones like the Russian one), to construct classifiers universally operating under sharp changes of external conditions is problematic because of problems connected with overtraining. In addition to apply classifiers correctly, the global analysis of the scene is required. Otherwise, they will find things that are absent in the scene and may invent non-existing things (it is necessary to employ right classifiers).

It is inevitable that the camera may lose objects in sharp turns of the vehicle and under occlusions caused by big other participants of the traffic. Note that it is important that at those moments they would not invent

non-existing objects initiating incorrect control actions. It is the high ability to understand quickly unexpected scenes that allows human-driver act correctly and change instantaneously behavior models in fast changing and extreme situations. A system for general-purpose analysis of scenes by vision has to be an important component of the intelligent system of autonomous robots-vehicles. It is useful to employ laser rangefinders in such systems, but their application is restricted for some reasons (small range of view, impossibility of solving fine recognition problems, poor operation under precipitation and their consequences, ambiguous results under contacts with vegetation). Therefore the analysis of color TV images will be widely employed in solving problems of this type. To solve such problems, it is very important to use distinguished scene representations. Under operation in the conditions of sufficient illumination (tremendous progress in designing TV cameras extends continually the range of these conditions), it very important to employ TV vision. In [2–4] new real-time methods for description, segmentation, and understanding of color images have been developed. These methods make it possible to process video at 20 fps using ordinary personal computers without using special–purpose devices. This makes cheaper the production and exploitation of robots substantially. In addition this approach makes it possible to solve in real time several tasks simultaneously, such as finding the road and evaluating its parameters, the analysis of its surrounding (vegetation, region of sky in the frame, fences, houses, etc.), detection of other participants of the traffic and the analysis of their parameters and behavior.

Now in the Keldysh Institute of Applied Mathematics of RAS, by a group of researches leaded by V.E. Pavlovskiy, a project for controlling a robot-vehicle based on a production vehicle "Niva" produced by VAZ is being conducted. It is prepared to test the robot-vehicle in the mode of autonomous motion on roads. In this paper, a brief description is proposed for the suggested algorithms of processing video sequences of color images of road scenes, and the results of experiments on video sequences are presented.

1.A new method of concise description of color images: detection of key objects in road scenes

The proposed algorithms for understanding road scenes are based on the geometrized histogram method, developed by the author [2--4]. This method is a far extension of the method applied by the author in the successful soviet project on autonomous road following [5].

Using methods developed in [2--4], we can attach to each color image the graph of color bunches *STG*. To construct *STG*, the image is divided into strips of the same width parallel to the horizontal or vertical axis of the image plane *Os*. Each strip is described by the set of color bunches. Each color bunch is characterized by the following parameters: 1. an interval $[beg_b, end_b]$ – the beginning and end of b on *Os*; $\Delta_H{}^b = [H_{min}{}^b, H_{max}{}^b]$ and $H_{mean}{}^b$ – the range and the mean value of the hue of b; $\Delta_S{}^b = [S_{min}{}^b, S_{max}{}^b]$ and $S_{mean}{}^b$ – the range and mean value of saturation; $\Delta_I{}^b = [I_{min}{}^b, I_{max}{}^b]$ and $I_{mean}{}^b$ – the range and the mean value of the grayscale intensity, and the cardinality $Card^b$(approximately, the number of points in the strip in the pre-image of $[beg_b, end_b]$ in the strip that have the color characteristics belonging to the ranges of the color bunch). Informally, each bunch describes a certain part of a real object in the strip, its projection on *Os* and the description of numerical characteristics of this part of the object. The graph *STG* can be interpreted geometrically by overlaying intervals of its bunches ($[beg_b, end_b]$) on the middle lines of the corresponding strips.

The description of the image by color bunches compresses the information on images from millions of pixels to several hundreds of bunches. For each video sequence of images of real world, we can construct a video sequence of images constructed from color bunches only overlaid on the image rectangle. An example of a video sequence shot in a busy street can be found in [6]. Figure 1 shows an image of a road scene and the corresponding image of color bunches with imposed boundaries of vegetation and a selected construction cone, which were detected by the program in an autonomous mode. Many tasks for finding landmarks can be reformulated strictly as tasks for finding images of these landmarks on the graph of color bunches. For these purposes, in [3] the concepts of left and right contrast curves in *STG* were introduced, and a bipartite graph of left and right contrast curves *LRG* was constructed. If the image is divided into horizontal strips, then informally a left or right contrast curve is a chain of color bunches in adjacent strips with similar color characteristics such that their left or right ends vary continuously, while their adjacent color bunches have contrast color characteristics. Such a chain is constructed upward, passing from strip to strip. Figure 2 demonstrates examples of chains of bunches, which generate left and right contrast curves. Left and right contrast curves are connected by an edge in *LRG*, if a part of bunches generating them can be connected in the same strip by chains of other bunches without contrast transitions. In particular, if the sequence of left and right ends of a chain of bunches give left and right contrast curves simultaneously, then their connected component in *LRG* contains only of these two contrast curves (left and right simultaneously). Connected components in *LRG* determine contours in images that are the boundaries of regions and are furnished with information about color parameters of these regions. Figure 1 (right-hand side) shows color bunches overlaid on the middle line of strips. The set of left and right contrast curves from a connected component determines

the shape of the obtained region. On the set of color bunches (nodes of *LRG*) partial function *Bel*L and *Bel*R, which attach to color bunches left and right contrast curves that pass through this color bunch,

*Bel*L(*Bel*R): *STG* →*LRG*.

In each strip, we are able to select basic color bunches that dominate in its part of the strip (having the biggest density). On the set of dominating color bunches, it is possible to introduce a complete ordering (to number dominating color bunches from 0 to a certain *k*). The constructed ordering (bunches are numbered with preservation of adjacency relation) allows one to construct the adjacency graph *ADG* which determines adjacency relation for constructed contrast objects in *STG*. The graph *ADG* makes it possible to assemble complex real objects, which contain heterogeneous parts. In this graph not only relations between objects that have common boundaries are established, but between objects separated by occlusions as well. For example using *ADG*, it is possible to recover relations between parts of the road separated by occlusions caused by other participations of the traffic. New results connected with a detailed construction and application of *ADG* can be found in [7].

The developed technique allows detecting contrast objects in images, evaluating their shape and color characteristics and tracking their motion in video sequences. The same technique makes it possible to define formally images of real landmarks in *STG*. Since the problem of finding landmarks is solved without further using of image arrays, we have managed to reach the speed of finding landmarks of order of 20 fps on modern personal computers with a processor of type of Intel i3–i7 for frames of the resolution of 640x480.

2.Tasks for finding key objects in the road scene implemented in the CVS (Computer Vision System) of the robot-vehicle "Avto Niva" based on the geometrized histogram method

Based on the proposed theory in the CVS of the robot "Avto Niva " algorithms for finding key objects and landmarks of several types have been developed. Among the key objects are the road surface, other participant of the traffic, characteristic plots on them (side, turn, breaking lights), vegetation in a neighborhood of the road, other objects in the surrounding places, and the sky region in the frame. Since the robot-vehicle is aimed at driving on standard Russian roads, including dirt bumpy roads, this imposes special requirements on the set of key elements characterizing the road. Substantial attention is paid to analysis of the road neighborhood. Under the presence of puddles and strong shadows, under the absence or strong damages of road marking typical of our roads (especially in the end of winter and in spring), the analysis of road side is important. In this paper algorithms for finding vegetation zone near the road, road region (possibly including close road sides), and sky region in the frame are described. Algorithms for finding other key objects will be described in the following publications. Algorithms for finding boundaries of vegetation near the road, the road region, and the sky region are based on the analysis of the geometry and color and intensity characteristics of contrast objects selected in *STG*. The analysis of adjacency relation of contrast objects and their location in the frame are also important for qualitative decision on the character of the scene. In general each of the objects (vegetation, road, sky) may consists of several heterogeneous contrast objects and cannot be selected by specifying some thresholds for color and intensity characteristics.

For the sky these heterogeneous contrast objects contain of parts of clean sky, illuminated in different ways, cloud zones having different densities and also illuminated in different ways. In addition brightness of clouds may be smaller than that of the road closing up with it (in motion on ascent), and as a rule it is less than those of the road side in winter because of snow. The problem becomes especially complex in urban area. Walls of buildings (especially when there are no windows on them) become distinguishable from sky parts only with account of fine global geometric features such as straight lines in their boundaries. In a similar way the road with puddles, wet spots, dirt spots, cracks and defects of the road surface is also a complex object for recognition. For example, puddles located near the road boundary may reflect vegetation and have its color and intensity characteristics. Wet regions in the end of the road may have color and intensity characteristics of sky regions and close up with them actually (Fig. 1). Only fine shape analysis (converging character of the boundaries of the road part) and analysis of adjacent objects (a thin strip of vegetation between the road and sky) allow us to distinguish these different objects.

Taking into account the aforesaid, for each contrast object, which is the union of left and right contrast curves, the structure describing objects adjacent to the chosen one is introduced. Since complete ordering is specified on the set of color bunches for each strip, going from bottom to top over strips along the boundary of the selected object over adjacent color bunches using the function *Bel*L(*Bel*R), we construct a list of left (right) objects adjacent to the chosen one. In a similar way using the ordering, it is possible to find all global objects that are adjacent to the chosen one from top and bottom. The structure *Local* is employed for this purpose. This structure makes it possible to determine at each point of the strip the color bunches that pass through this place of the strip. Using this structure, for each color bunch of the chosen object belonging to its upper and lower strips, we can find color bunches lying over (under) this bunch in the adjacent upper and

lower strips. After this using the function *Bel*L(*Bel*R), we can find all objects adjacent to the chosen one. Repeating the specified procedure in the motion to the left and right along the strip and to the top and bottom, we can find objects with prescribed properties far from the given object. Using the proposed scheme, it is possible to design a reasoning system for scene analysis and finding and constructing objects with prescribed properties. Based on the described technique, reasoning systems for finding the boundary of vegetation near the road, the road region and sky region have been designed. For example, the region that is close in color parameters to the sky and located in the top part of the frame and under part of vegetation, but having converging boundaries is attributed to the road. However the region with diverging boundaries and lying over vegetation and having adjacent sky regions is attributed to the sky. A vegetation region that are relatively near the road and having from the opposite side a vegetation region such that the boundaries of both regions converge to each other is attributed as a vegetation region confining the road.

3.Program implementation and experimental results

A program package for CVS of robot "Avto Niva" is written in C++ and works under operating system Linux (Ubuntu 16). For image input and the output of results the facilities of OpenCV are employed.

Figure 1 – Color bunches of a road scene with the selected boundaries of vegetation and a detected construction cone

The developed programs have been debugged using a large number of video sequences shot from moving vehicles. Figure 3 shows the results of processing frames from different video sequences with superimposed color bunches belonging to the sky. These bunches are colored in black.

Figure 2 – Left and right contrast curves corresponding to the road and vegetation road sides

4. Conclusions and new developments

Based on a new technique for description segmentation of color images, programs have been developed for CVS of robot "Avto Niva" for autonomous road following. Programs have been tested on a big number of video sequences shot in motion on different roads. The program package is prepared for testing on the vehicle in autonomous riding on bumpy dirt roads. Programs analyzing road marking and finding other participants of the traffic and analyzing their behavior is being developed.

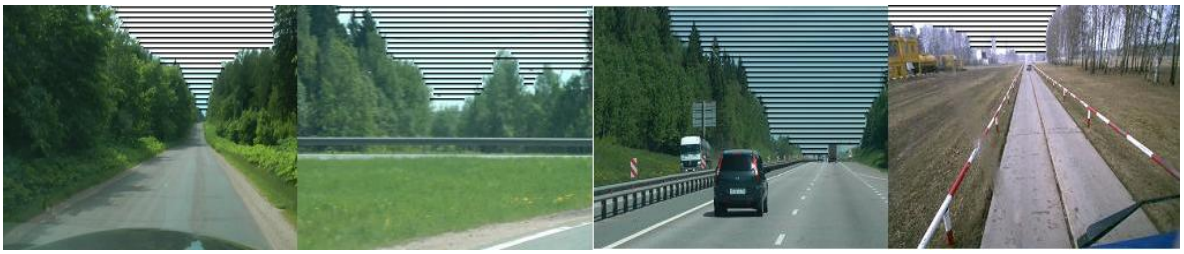


Figure 3 – Results of finding sky in frames from different video sequences

1. https://www.google.com/selfdrivingcar/.
2. K.I. Kiy, A new real-time method for description and generalized segmentation of color images, Pattern Recognition and Image Analysis. 2010. N. 2. P. 169-178.

3. K.I. Kiy, Segmentation and detection of contrast objects and their application in robot navigation, Pattern Recognition and Image Analysis. 2015. N. 2. P. 338-346.
4. K.I. Kiy, A new real-time method of contextual image description and its application in robot navigation and intelligent control, in Computer Vision in Control Systems-2. Innovations in Practice, Springer, Intelligence Systems Reference Library. Vol. 75, Ch. 5. P. 109-133. 2015.
5. K.I. Kiy, A.V. Klimontovich, G.A. Buyvolov, Vision-based system for road following in real time. International Conference on Advanced Robotics ICAR'95. Vol. 1. P. 115–124, 1995.http://video.mail.ru/mail/kikip_46/_myvideo/.
6. K.I. Kiy, Geometrized histogram method of global real-time analysis of regions: application to recognition of road scenes and navigation of autonomous vehicles, in Computer Vision in Control Systems-3. Innovations in Practice, Springer Book Series 8578, 2017, in press.

К.И. Кий

СИСТЕМА КОМПЛЕКСНОГО АНАЛИЗА ДОРОЖНОЙ СЦЕНЫ ДЛЯ НАВИГАЦИИ АВТОНОМНОГО РОБОТА НА ДОРОГЕ

Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва
kikip_46@mail.ru

Аннотация

В работе описывается система комплексного анализа дорожной сцены с помощью цветного телевизионного зрения. Также излагаются принципы разработки зрительных алгоритмов и построения системы. Приводятся результаты программных экспериментов с видеопоследовательностями, снятыми с автомобилей при движении.

Ключевые слова: компьютерное зрение, понимание изображений, автономное движение по дорогам.

Введение

В последнее время имеются значительные достижения в создании роботов-автомобилей для движения по дорогам общего пользования. Опытные образцы автомобилей-роботов имеются у многих ведущих фирм производителей автотранспорта. В частности продвинутые образцы автомобилей-роботов имеются у Daimler, Google и других компаний. Google-vehicle регулярно ездит по дорогом, и отчеты о его поездках можно найти на сайте [1]. В связи с продвижением разработок в этой области возникают многочисленные задачи для компьютерного зрения. Имеется несколько различных подходов к решению этих задач. Последнее время на первый план вышли методы обучения и построения классификаторов, призванных решать строго определенные задачи (дорога, разметка, другие участники движения и пешеходы, и т.д.). Так как автомобилю приходится двигаться при сильно меняющихся внешних условиях (особенно это характерно для климатических зон, похожих на нашу), построение классификаторов, универсально работающих при резких изменениях внешних условий, проблематично вследствие сложностей, связанных с переобучением. Кроме того, для применения классификаторов необходим общий глобальный анализ сцены, чтобы не искать того, чего заведомо нет на сцене и не придумывать того, чего нет (задействовать подходящие классификаторы).

Потеря объекта камерами при движении на крутых поворотах и при заслонениях большими другими участниками движения неизбежна. При этом очень важно, чтобы в эти моменты классификаторы не придумывали бы несуществующие объекты, инициирую неправильные управляющие воздействия. Именно высокая способность к быстрому пониманию неожиданных сцен позволяет человеку-водителю правильно действовать и мгновенно менять модели поведения в быстро меняющихся и экстремальных ситуациях. Система общего анализа сцены по зрению должна стать важной составляющей интеллектуальной системы автономных роботов-автомобилей. Использование лазерных дальномеров и радаров очень полезно в подобных системах, но имеет свои ограничения (небольшая дальность обзора, невозможность решения тонких задач распознавания, плохая работа в условиях атмосферных осадков и их последствий, неоднозначные результаты при контакте с растительностью). Поэтому анализ телевизионных цветных изображений будет широко использоваться при решении данных задач. Для решения подобных задач существенно важно использовать продвинутые представления сцены. При работе в условиях достаточной освещенности (значительный прогресс в разработке телекамер постоянно расширяет диапазон этих условий) очень важно использование цветного телевизионного зрения. В [2–4] разработаны новые методы описания, сегментации, и понимания цветных изображений реального времени, которые позволяют вести обработку видео со скоростью 20fps на существующих персональных компьютерах без использования

специальных вычислительных средств. Это существенно удешевляет разработку и эксплуатацию роботов. Кроме того, данный подход позволяет решать в реальном времени одновременно несколько задач, таких как поиск дороги и оценка ее параметров, анализ ее окружения (растительность, область неба в кадре, заборы, дома, и т.д.), выявление других участников движения и анализ их параметров и поведения.

В настоящее время в Институте Прикладной Математики им. Келдыша РАН коллективом, возглавляемым В.Е. Павловским, реализуется проект по управлению автомобилем–роботом на базе серийного автомобиля Нива, выпущенного ВАЗ. Готовятся испытания движения автомобиля-робота на дорогах в автоматическом режиме. В настоящее время отрабатываются зрительные алгоритмы на видеопоследовательностях, снятых при движении автомобиля по дорогам. В работе предлагается краткое описание предложенных алгоритмов обработки видеопоследовательностей цветных изображений дорожных сцен и приводятся результаты экспериментов на видеопоследовательностях.

1.Новый метод содержательного описания цветных изображений: выделение ключевых объектов в дорожных сценах

Предлагаемые алгоритмы понимания дорожных сцен основаны на методе геометризованных гистограмм, разработанным автором [2--4]. Данный метод является далеким развитием метода, примененного автором в успешном советском проекте по автономному движению по дорогам [5].

С помощью техники, разработанной в [2--4], каждому цветному изображению ставится в соответствие граф цветовых сгустков *STG*. Для построения *STG* изображение разбивается на полосы одинаковой ширины, параллельные горизонтальной или вертикальной оси плоскости изображения *Os*. Каждая полоса описывается множеством цветовых сгустков. Каждый цветовой сгусток b характеризуется следующими параметрами: 1. интервал $[beg_b, end_b]$ – начало и конец b на оси *Os*; $\Delta_H{}^b = [H_{min}{}^b, H_{max}{}^b]$ и $H_{mean}{}^b$ – диапазон и среднее значение цветового оттенка b; $\Delta_S{}^b = [S_{min}{}^b, S_{max}{}^b]$ и $S_{mean}{}^b$ – диапазон и среднее значение цветового насыщения; $\Delta_I{}^b = [I_{min}{}^b, I_{max}{}^b]$ и $I_{mean}{}^b$ – диапазон и среднее значения полутоновой компоненты, и мощность сгустка $Card^b$(приблизительно, число точек в прообразе интервала в полосе, которые имеют цветовые характеристики, принадлежащие диапазонам цветового сгустка). Неформально, каждый сгусток дает описание некоторой части реального объекта в полосе, его проекцию на ось *Os* и описание значений численных характеристик этой части объекта. *STG* можно интерпретировать геометрически с помощью наложения отрезков его сгустков ($[beg_b, end_b]$) на центральную линию соответствующей полосы. Описание изображений с помощью цветовых сгустков сжимает информации об изображении с миллионов пикселов до нескольких сотен сгустков. Для каждой видеопоследовательности изображений реального мира можно построить последовательность изображений, составленных из цветовых сгустков, наложенных на плоскость изображения. Пример видеопоследовательности сгустков для видеопоследовательности, снятой на оживленной улице, может быть найден в [6]. Рисунок 1 показывает изображение дорожной сцены и соответствующее изображение цветовых сгустков с нанесенными границами растительности и выделенным строительным конусом, которые были детектированы программой в автоматическом режиме. Многие задачи по поиску ориентиров и объектов в кадре, можно переформулировать строго как задачи поиска некоторых абстрактных объектов на графе цветовых сгустков. Для этих целей в [3] введены понятия левых и правых контрастных кривых на *STG* и определен двудольный граф левых и правых контрастных кривых *LRG*. Если изображение разбито на горизонтальные полосы, то неформально левая или правая контрастная кривая есть цепочка цветовых сгустков в соседних полосах с подобными цветовыми характеристиками. При том, левые или правые концы цветовых сгустков меняются от полосы к полосе “непрерывно”, и соседние в той же полосе слева или справа цветовые сгустки имеют контрастные цветовые характеристики. Эта цепочка строится снизу вверх, переходя из полосы в полосу. Рисунок 2 показывает примеры цепочек сгустков, которые образуют левые и правые контрастные кривые. Левая и правая контрастная кривая соединены ребром в *LRG*, если часть сгустков, их образующих, можно соединить цепочками других цветовых сгустков в одной и той же полосе без контрастных переходов. В частности, если последовательность концов левых и правых концов цепочки сгустков дают левую и правую контрастную кривую одновременно, то связная компонента на *LRG* состоит только из них самих. Связные компоненты в *LRG* определяют контура на изображении, которые являются границами областей и снабжены информацией о цветовых параметрах этих областей. Рисунок 1 (правая часть) показывает цветовые сгустки, наложенные на средние линии полос. Набор левых и правых контрастных кривых из связной компоненты определяет форму полученной области. На множестве цветовых сгустков (вершинах *LRG*) определены частичные функция *Bel*Land*Bel*R, которые ставят в соответствие цветовым сгусткам левые или правые контрастные кривые, которые проходят через этот цветовой сгусток,

*Bel*L(*Bel*R): *STG* →*LRG*.

В каждой полосе удается выделить основные цветовые сгустки, которые являются доминирующими в своем участке полосы (имеющими наибольшую плотность). На множестве доминирующих цветовых сгустков удается задать структуру полной упорядоченности (перенумеровать доминирующие цветовые сгустки от 0 до некоторого *k*). Построенное упорядочивание (сгустки перенумерованы с сохранением отношения соседства) позволяет построить граф соседства *ADG* (adjacencygraph) для построенных контрастных объектов в *STG*. Граф *ADG* позволяет собирать сложные реальные объекты, которые состоят из разнородных частей. В этом графе устанавливаются отношения не только между объектами, которые непосредственно граничат друг с другом, но и между объектами изображения, разделенными заслонениями от других объектов. Например, с помощью графа *ADG* можно восстанавливать связи между частями дороги, связь между которыми прервана заслонениями от других транспортных средств, участвующих в движении. Новым результатам, связанным с детальным построением и применением графа *ADG*посвящена работа автора, находящаяся в печати [7].

Разработанная техника позволяет выделять контрастные объекты на изображении, оценивать их форму и цветовые характеристики и отслеживать их движение в видеопоследовательностях. Эта же техника позволяет формально определить образы реальных объектов на *STG*. Так как задачи поиска образов объектов решаются без обращения к массивам изображений, удается достичь скорости их поиска порядка 20 fps на современном персональном компьютере с процессором типа Intel i3–i7 для размера кадра 640x480.

2.Задачи по поиску ключевых объектов на дорожной сцене, реализованные в СТЗ робота-автомобиля “авто НИВА” на базе метода геометризованных гистограмм

На основе предложенной теории в СТЗ робота “Авто Нива” разрабатываются алгоритмы поиска ключевых объектов и ориентиров нескольких типов. К ключевым объектам относятся полотно дороги, разметка на ней, другие участники движения, характерные участки на них (габариты, сигналы поворота, торможения), растительность в окрестности дороги, другие объекты в ее окрестности и область неба в кадре. Поскольку робот-автомобиль предназначен для движения по стандартным российским дорогам, включая проселочные дороги, это предъявляет особые требования к набору ключевых элементов, характеризующих дорогу. Существенное внимание уделено анализу окрестности дороги. При наличии луж и сильных затенений, при отсутствии или сильном повреждении разметки, характерным для наших дорог (особенно в конце зимы и весной), анализ обочины дороги имеет важное значение. В настоящей работе будут описаны алгоритмы анализа области растительности в окрестности дороги и ее границы с областью дороги, области дороги (включая возможно области обочин) и поиска области неба в кадре. Алгоритмы по поиску других ключевых объектов будут описаны в других публикациях.

В основе алгоритмов поиска границы растительности в окрестности дороги, выделения областей дороги и неба лежит анализ геометрии и цветовых и яркостных характеристик контрастных объектов, выделенных на графе *STG*. Существенную роль также играет анализ отношения соседства контрастных объектов и их положение в кадре для качественных выводов о характере сцены. В общем случае, каждый из объектов (растительность, дорога, небо) может состоять из нескольких разнородных контрастных объектов и не может быть выделен заданием каких-то порогов цветовых или яркостных характеристик. Для неба эти разнородные контрастные объекты состоят из кусков чистого неба, освещенных разным образом, зон облаков, имеющих разную плотность и также освещенных разным образом. Кроме того, яркость части облаков может быть ниже, чем яркость дороги смыкающейся с ней (при движении на подъем), и, как правило, она меньше окружения дороги из-за снега зимой. Особенно сложной становится задача выделения неба в городских условиях. Стены домов (особенно, при отсутствии окон на них) становятся отличимыми от участков неба только с учетом тонких глобальных геометрических признаков, таких как наличие прямых линий в их границах. Аналогичным образом, дорога с лужами, влажными пятнами, пятнами грязи, трещинами и дефектами покрытия также является сложным объектом для распознавания. Например, лужи, расположенные у края дороги, могут отражать растительность и иметь ее цветовые и яркостные характеристики. Влажные области в конце дороги также могут иметь цветовые и яркостные характеристики участков неба и фактически с ними смыкаться (Рис. 1). Только тонкий анализ формы (сходящийся характер границ участка дороги) и анализ соседних объектов (тонкая полоска растительности между дорогой и небом) позволяют различить эти разные объекты.

С учетом сказанного выше, для каждого контрастного объекта, который является объединением левых и правых контрастных граничных кривых, строится структура соседних контрастных объектов.

Так как на множестве цветовых сгустков в каждой полосе задано полное упорядочивание, двигаясь снизу наверх по полосам вдоль границы выбранного объекта по соседним цветовым сгусткам, используя функции *Bel*L(*Bel*R), строим список левых (правых) объектов, примыкающих к заданному. Аналогичным образом, используя упорядоченность базисных структурных сгустков, можно найти все глобальные объекты, которые граничат с выделенным сверху и снизу. Для этого используется структура *Local* , позволяющая в каждой полосе для каждой ее точки определить, какие цветовые сгустки проходят через это место в полосе. Используя эту структуру, для каждого цветового сгустка, лежащего на последней и первой полосах выделенного объекта, можно найти цветовые сгустки в соседних верхних и нижних полосах, лежащие над (под) этим сгустком. Далее, используя функцию *Bel*L(*Bel*R), можно найти все объекты, граничащие с данным. Повторяя указанную процедуру при движении влево и вправо по полосе и вверх и вниз по полосам, можно искать объекты с заданными свойствами уже в отдалении от заданного объекта. Используя предложенную схему, можно строить систему рассуждений для анализа кадра и поиска и построения объектов с заданными свойствами. На основе данной техники построены системы рассуждения для поиска границы растительности в окрестности дороги, областей дороги и неба в кадре. Например, область, по цветовым параметрам близкая к небу расположенная в верхней части кадра, но имеющая сходящиеся границы и ”накрытая” сверху растительностью, будет отнесена к дороге. А область с расходящимися границами и лежащая над растительностью и имеющая сверху области неба будет отнесена к небу. Зона растительности, имеющая в достаточно близкой окрестности зону дороги и с противоположной стороны зону растительности такую, что границы обеих зон сходятся, считается зоной растительности, ограничивающей дорогу и т. д.

3.Программнаяреализация и экспериментальные результаты

Пакет программ для СТЗ робота “Авто Нива” написан на C++ и работает в операционной системе Linux (Ubuntu 16). Для ввода изображений и записи результатов испытаний используются возможности OpenCV.

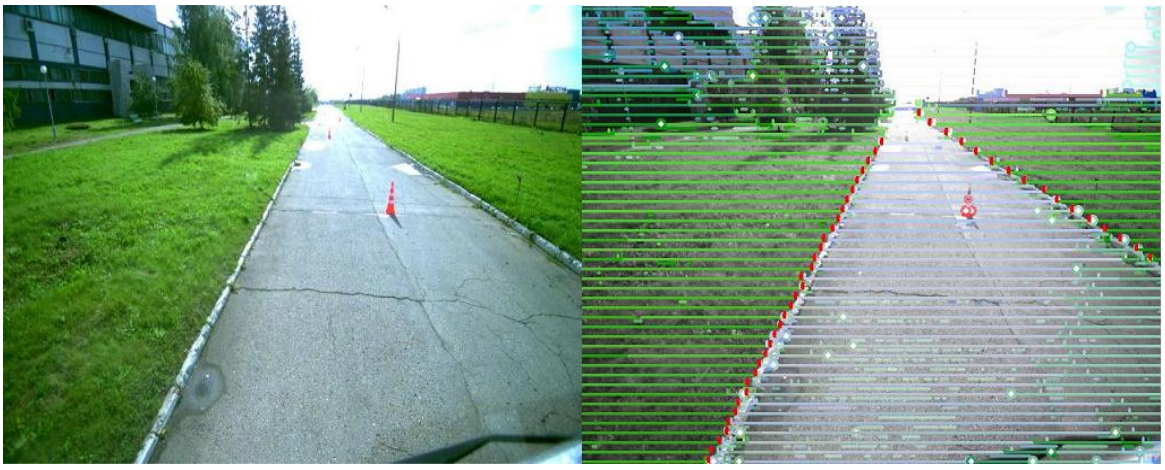


Рисунок 1 – Цветовые сгустки дорожной сцены с выделенной границей зелени и обнаруженным конусом для обозначения строительных работ

Разработанные программы отработаны на большом числе видеопоследовательностей, снятых при движении автомобилей. Рисунок 3 показывает результаты обработки кадров из различных видеопоследовательностей с наложенными цветовыми сгустками, принадлежащими области неба. Эти сгустки выделены черным цветом.

Рисунок 2 – Правые и левые контрастные кривые, соответствующие дороге и обочинам

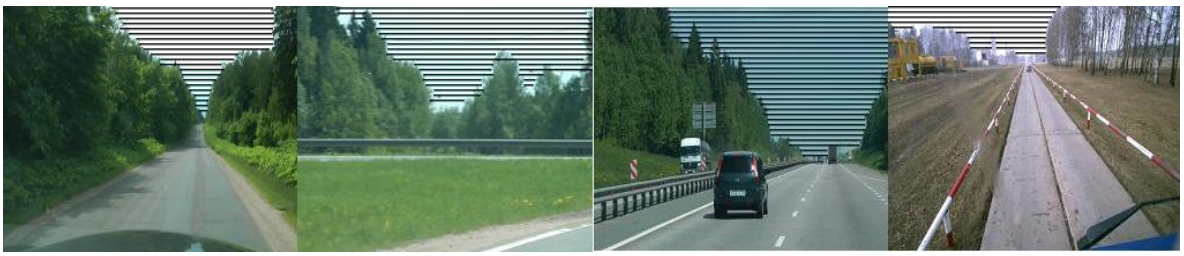


Рисунок 3 – Результаты поиска неба на кадрах из разных видеопоследовательностей

4. Выводы и новые разработки

На основе новой техники по описанию и сегментации цветных изображений разработаны программы в состав СТЗ робота “Авто Нива” для автономного движения по дорогам. Программы были протестированы на большом количестве видеопоследовательностей, снятых при движении по разным дорогам. Комплекс программ готовится к испытаниям при автономном движении по проселочным дорогам. Производится разработка программ, анализирующих разметку и находящих других участников движения и их поведение.

1. https://www.google.com/selfdrivingcar/.
2. K.I. Kiy, A new real-time method for description and generalized segmentation of color images, Pattern Recognition and Image Analysis. 2010. N. 2. P. 169-178.
3. K.I. Kiy, Segmentation and detection of contrast objects and their application in robot navigation, Pattern Recognition and Image Analysis. 2015. N. 2. P. 338-346.
4. K.I. Kiy, A new real-time method of contextual image description and its application in robot navigation and intelligent control, in Computer Vision in Control Systems-2. Innovations in Practice, Springer, Intelligence Systems Reference Library. Vol. 75, Ch. 5. P. 109-133. 2015.
5. K.I. Kiy, A.V. Klimontovich, G.A. Buyvolov, Vision-based system for road following in real time. International Conference on Advanced Robotics ICAR’95. Vol. 1. P. 115–124, 1995.
6. http://video.mail.ru/mail/kikip_46/_myvideo/.
7. K.I. Kiy, Geometrized histogram method of global real-time analysis of regions: application to recognition of road scenes and navigation of autonomous vehicles, in Computer Vision in Control Systems-3. Innovations in Practice, Springer Book Series 8578, 2017, in press.

A.A. Andreychuk, A.V. Bokovoy, K.S. Yakovlev

VAN EMPIRICAL EVALUATION OF GRID-BASED PATH PLANNING ALGORITHMS ON WIDELY USED IN ROBOTICS RASPBERRY PI PLATFORM

Federal Research Center Computer Science and Control of Russian Academy of Sciences
{andreychuk, bokovoy, yakovlev}@isa.ru

Abstract

Performance of the three wide-spread path planning algorithms - A*, Jump Point Search, Theta* - is experimentally evaluated on a conventional desktop and a wide-spread in robotics community Raspberry Pi 2 computer. The main question is to what extend modern embedded PCs are slower than desktops in solving path finding tasks.

Keywords: path planning, path finding, heuristic search, experimental evaluation, A*, JPS, Theta*, Raspberry Pi

А.А. Андрейчук, А.В. Боковой, К.С. Яковлев

ОЦЕНКА БЫСТРОДЕЙСТВИЯ НЕКОТОРЫХ АЛГОРИТМОВ ПЛАНИРОВАНИЯ ТРАЕКТОРИИ НА ШИРОКО ИСПОЛЬЗУЕМОЙ В РОБОТОТЕХНИКЕ ПЛАТФОРМЕ RASPBERRYPI

Федеральный исследовательский институт
«Информатика и управление» РАН, Москва
{andreychuk, bokovoy, yakovlev}@isa.ru

Аннотация

В работе проводятся экспериментальные исследования распространенных алгоритмов планирования траектории: A*, JumpPointSearch, Theta*, LIAN с целью сравнительной оценки их быстродействия на персональном компьютере и встраиваемом вычислителе RaspberryPi 2, который широко используется в современной робототехнике. Целью работы является получение ответа на вопрос «насколько современные встраиваемые компьютеры медленнее, чем обычный персональный компьютер при решении задач планирования траектории на плоскости»?

Ключевые слова: планирование, планирование траектории, эвристический поиск, экспериментальное исследование, A*, JPS, Theta*, Raspberry Pi.

Введение

В настоящее время существуют два распространенных подхода к проведению экспериментальных исследований различных алгоритмов планирования траектории. Если алгоритм исследуется специалистами по эвристическому поиску и искусственному интеллекту («теоретиками»), то, как правило, речь идет о запуске тысяч модельных сценариев на внушительных, специально подготовленных коллекциях данных с использованием персонального компьютера [1][2][3]. Если же исследования проводятся специалистами в области робототехники, то эксперименты скорее будут проводиться на реальном, вполне определённом мобильном роботе, оснащенным специальным вычислителем, который может значительно отличаться от персонального компьютера [4][5][6]. При этом во втором случае обычно рассматриваются лишь конкретные постановки задачи и навигационные сценарии. Очевидно, что оба подхода важны для изучения прикладных характеристик алгоритмов планирования. Первый подход позволяет ответить на вопрос “насколько алгоритм лучше или хуже уже существующих для большого количества различных *модельных* сценариев”, второй – “насколько быстро алгоритм работает на *реальной* (конкретной) робототехнической системе (на ограниченных однотипных сценариях)”. Важно понимать, что получить общий ответ на второй вопрос невозможно (т.к. все робототехнические платформы обладают различными характеристиками), но тем не менее, такой ответ был полезен сообществу. Конечно, желательно, чтобы расчет траектории на бортовом вычислителе производился с такой же скоростью, как и на персональном компьютере (доли секунды). Но интуитивно понятно, что легкие, энерго-эффективные встраиваемые компьютеры, которые, как правило, используются в качестве бортовых вычислителей на мобильных робототехнических устройствах (например, на мультироторных беспилотных летательных аппаратах), уступают в производительности персональным компьютерам. Насколько известно авторам, до текущего момента исследований, посвященных сравнению быстродействия алгоритмов планирования траектории, выполняющихся на бортовых вычислителях мобильных роботов и настольных компьютерах, проведено не было. Целью данной работы является заполнение этого пробела.

Для решения поставленной задачи был проведен ряд экспериментов с использованием карт и заданий из широко распространенной коллекции, предложенной NathanSturtevant – movingai [7] (также, были использованы авторские дополнительные коллекции) как на обычном персональном компьютере (с характеристиками: IntelCorei7-4790 3,6 GHz, 16 GBRAM), так и на часто применяемом в робототехнике одноплатном компьютере RaspberryPi 2 (ARMCortex-A7 900 MHz, 1GBRAM) [8][9][10]. Было проведено исследование трех известных алгоритмов планирования траекторий: A*, JumpPointSearch, Theta* и недавно представленного авторами алгоритма поиска траекторий – LIAN [11]. Все алгоритмы были реализованы самостоятельно, с использованием одних и те же структур данных и техник программирования. Код опубликован в открытом доступе.

1. Эксперимент

1.1 Техническое обеспечение

В ходе эксперимента были использованы два компьютера и две операционные системы. Первый – обычный персональный компьютер со следующими характеристиками: IntelCorei7-4790 3.6 GHz, 16 GBRAM под управлением операционной системы LinuxDebian 8 с ядром версии 3.16.7. Второй – портативный, широко используемый в робототехнике одноплатный компьютер RaspberryPiModelB, оснащенный 4-х ядерным процессором ARMCortex-A7 900 MHz, 1 GBRAM под управлением операционной системы LinuxRaspbian с ядром версии 4.1.7 PREEMPT_RT.

1.2 Карты и задания

Для проведения экспериментов использовалась широко известная коллекция movingai [7]. Из неё были использованы следующие карты: BaldursGate (75 карт), WarcraftIII (36 карт), Randomobstacles 10% fill (10 карт), RandomObstacles 25% fill (10 карт), RandomObstacles 40% fill (10 карт),

Mazescorridorwidth 2 (10 карт), Mazescorridorwidth 4 (10 карт), Mazescorridorwidth 8 (10 карт), Roomssize 16 (10 карт), Roomssize 32 (10 карт), Roomssize 64 (10 карт).

Также, были проведены эксперименты на разработанной нами коллекции - City. Карты этой коллекции представляют собой модели реальных фрагментов городской местности, извлеченные из открытой геоинформационной базы данных OpenStreetMaps.

Размеры всех карт составляли (примерно) 500 на 500 ячеек, каждая из которых либо проходима либо нет. На каждой карты были отмечены 5 позиций старт-финиш. Для карт из коллекции movingai такие позиции были выбраны следующим образом. Все пары старт-финиш из были отсортированы по длине результирующего пути (эта информация доступна для коллекции movingai) по убыванию и среди них были выбраны первые пять пар. Для карт из коллекции City стартовые и конечные позиции были выбраны вручную на противоположных концах карт. В итоге тестовая коллекция составила 1505 заданий (доступных в открытом доступе: www.pathplanning.ru/public/er-2016).

1.3 Алгоритмы

Были рассмотрены следующие алгоритмы.

A* - эвристическая модификация алгоритма Дейкстры [12]. Один из наиболее распространённых алгоритмов, применяющихся в задачах планирования траектории.

JumpPointSearch (JPS) – модификация A*, позволяющая сократить пространство поиска и тем самым повысить вычислительную эффективность алгоритма при планировании траектории на плоскости.

Theta* (или **BasicTheta***) – модификация A*, которая сочетает исследование пространства состояний со сглаживанием [13]. Траектории, построенные Theta*, в большинстве случаев короче и характеризуется более низким числом смен направления движения, по сравнению с A*/JPS путями.

LIAN – алгоритм планирования траектории, который производит поиск пути в виде последовательности прямолинейных сегментов, таких что угол отклонения между ними не превышает заранее заданного порога [11]. Алгоритм LIAN представляет повышенный интерес для робототехники, поскольку позволяет строить плавные траектории без резких смен направления движения.

Все алгоритмы, за исключением LIAN, работают относительно быстро (доли секунды) на современных персональных компьютерах для карт размером до 1000 x 1000 ячеек (карты большего размера в практических задачах используются редко). Из-за иной структуры пространства поиска, алгоритм LIAN работает медленнее, и в некоторых случаях время его выполнения превышает разумный порог (1-10 секунд). Использование взвешенной эвристики позволяет увеличить производительность алгоритма LIAN, и при этом сохранить качество полученного результата (длину результирующей траектории) на приемлемом уровне. Предварительные эксперименты, результаты которых не включены в работу по причине ограниченного объема, показали, что использование эвристики с весом 2 позволяет значительно (на порядок) повысить скорость работы LIAN, при увеличении длины результирующей траектории всего на 2-3% (в среднем). Поэтому в дальнейших экспериментах использовалась именно такая эвристика.

1.4 Детали реализации

Все алгоритмы были написаны на языке C++ с использованием кросс-платформенных инструментов. В качестве компилятора был использован GCC 4.9.2. Код (как и все необходимые инструменты для компиляции программы) опубликованы по адресу www.pathplanning.ru/public/er-2016.

1.5 Экспериментальный анализ и результаты

В первой серии экспериментов исследовалось время работы алгоритмов JPS, A* и Theta на всех доступных 1505 заданий. В таблице 1 представлены результаты (полные данные доступны по адресу www.pathplanning.ru/public/er-2016). Первый столбец соответствует объединений коллекции City + Baldur'sGate + WarcraftIII (т.к. карты этих коллекций в определенном смысле схожи, а именно представляют собой открытые пространства с различными препятствиями).

Таблица 1. Среднее время выполнения алгоритмов A*, JPS, Theta* (в миллисекундах)

	City/Game Maps	**Mazes**	**Random Obstacles**	**Rooms**
JPS (pc)	2.52	11.58	36.54	5.82
JPS (ras)	*23.46*	*110.37*	*366.29*	*50.95*
A* (pc)	42.86	164.95	66.64	164.33
A (ras)*	*509.31*	*1844.98*	*739.00*	*1996.80*
Theta* (pc)	83.29	258.32	56.55	268.48
Theta (ras)*	*749.52*	*2544.49*	*582.10*	*2664.54*

Как видно из представленных данных, алгоритмы планирования траекторий на RaspberryPi работают в среднем 10 раз медленнее, чем на персональном компьютере, но точное значение среднего времени выполнения незначительно разнится в зависимости от алгоритма и коллекций. Для этого есть две возможные причины: 1) измерение времени для одного запуска программы не является 100% аккуратным; 2) операционная система влияет на время выполнения (например, с помощью прерываний). Это значит, что невозможно на 100% точно измерить время выполнения алгоритма. Определенно, этот вопрос должен быть более тщательно исследован, но пока он выходит за рамки работы.

Как видно из табл. 1, для некоторых коллекций (например карты City/Game, RandomObstacles) выполнение алгоритмов планирования происходит быстрее секунды. Если речь идет про коллекции Mazes и Rooms, время планирования с помощью алгоритма Theta* занимает около 2 секунд. Другими словами построение траекторий с меньшим количеством изменений направления движения (что хорошо для задач робототехники) происходит с задержкой в 1-2 секунды на современном встраиваемом вычислителе RaspberryPi 2. Это может быть критичным для некоторых задач, выполняемых в реальном времени. Построение же гарантированно гладких траекторий алгоритмом LIAN занимает еще больше времени.

При тестировании алгоритма LIAN использовались следующие значения ограничения на максимальный угол отклонения: 20°, 25° и 30° (значения были выбраны после консультации с коллегами, вовлеченными в разработку мультироторных БПЛА). Значение другого параметра алгоритма LIAN, Δ, было выбрано исходя из рекомендаций, приведенных в работе [11] (Δ=5). Тестирование проводилось только на картах из коллекций Game и City. Причиной исключения из эксперимента “искусственных” карт (Randomobstacles, Mazes и Rooms) является невозможность в большинстве случаев построить траектории при заданных ограничениях на угол отклонения на этих картах, что уменьшает выборку. В то же время для карт из коллекций Baldur’sGate (BG), WarcraftIII (WIII) и CityMaps (CM) решение существует для 95% заданий с ограничением на угол 20° или более.

В силу того, что алгоритм LIAN является довольно ресурсоемким, для каждого эксперимента было установлено ограничение в 10 секунд. Если алгоритм не находил путь за отведенное время, запуск признавался неудачным (failure). Усредненные результаты эксперимента представлены в табл. 2 (результаты failure не учитываются при измерении времени выполнения). Подробная статистика доступна по адресу www.pathplanning.ru/public/er-2016.

Таблица 2. Среднее время выполнение и процент успешных завершений алгоритма LIAN.

	W III		**BG**		**CM**	
	t	***sr***	***t***	***sr***	***t***	***sr***
				20°		
LIAN (pc)	99.03	100%	407.04	100%	28,45	100%
LIAN (ras)	*336.24*	*97,6%*	*1 131.32*	*89,4%*	*140,26*	*95,5%*
				25°		
LIAN (pc)	77.11	100%	645.17	99,7%	21,77	99.9%
LIAN (ras)	*424.34*	*98,3%*	*1 486.12*	*82,2%*	*115,71*	*93,2%*
				30°		
LIAN (pc)	79.58	100%	663.87	98,9%	23,55	99.6%
LIAN (ras)	*321.22*	*96,5%*	*1 473.55*	*79,3%*	*126,12*	*91,8%*

В представленной таблице, t – время (в миллисекундах), sr- процент успешных завершений. Как видно, в 1-10% случаев алгоритму LIAN на платформе RaspberryPi не удалось найти путь за отведенные 10 секунд. В то время как для персонального компьютера, количество таких заданий менее 1,2%. Как оказалось, коллекция Baldur’sGate является наиболее сложной для обработки алгоритмом LIAN, в то время как задания из коллекций WarcraftIII обрабатываются достаточно быстро, а а задания City – ещё быстрее (в среднем).

На рис. 1. Показана зависимость числа завершенных заданий от времени исполнения. На рисунке изображены только данные LIAN-25°, поскольку для других угловых ограничений (20° и 30°) прослеживается схожая зависимость. Полученные данные представляют усреднение результатов, полученных для всех коллекций (с учетом точного количества успешных завершений для каждой коллекции).

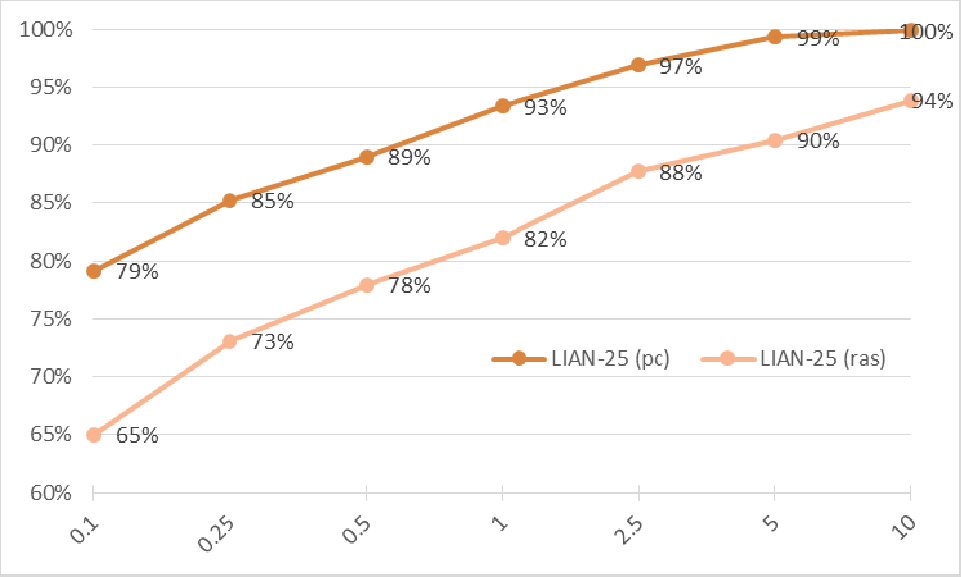


Рисунок 1 – Количество заданий (ось Y) успешно решенных за ограниченное время (ось X) для алгоритма LIAN-25

Как можно заметить, процент успешно завершенных заданий на платформе RaspberryPi на 10% меньше (в большинстве случаев), чем на персональном компьютере. Если установить ограничение в 1 секунду, то лишь 82% задач – разрешимы на RaspberryPi.

Как уже было замечено, значения из табл. 2 не могут сравниваться напрямую, поскольку количество решенных задач на Raspberry и персональном компьютере – разниться (эти значения также отличаются в зависимости от коллекций и ограничений на угол). Для корректного сравнения были отобраны 923 задания из всех коллекций, которые успешно разрешились на обеих платформах не зависимо от ограничения на угол. Среднее время выполнения таких задач представлено в табл. 3.

Таблица 3. Среднее время выполнения разрешимых заданий алгоритмом LIAN

	W III	**BG**	**CM**
		20°	
LIAN (pc)	32,12	71,99	17,47
LIAN (ras)	*269,66*	*598,21*	*139,68*
		25°	
LIAN (pc)	32,75	124,06	12,39
LIAN (ras)	*279,21*	*1 108,31*	*101,97*
		30°	
LIAN (pc)	37,94	146,29	12,89
LIAN (ras)	*335,31*	*1 356,71*	*107,59*

Согласно полученным данным, RaspberryPi в 8,7 раз медленнее, чем персональный компьютер (а не в 10 раз, как предполагалось раньше, что еще раз заставляет задуматься о том, что вмешательство операционной системы в работу алгоритма более критично, чем обычно представляется).

Заключение

Из анализа представленных в работе данных можно сделать следующий вывод. Решение заданий планирования траекторий на распространенной в современной робототехнике вычислительной платформе RaspberryPi 2 на один порядок (в 10 раз) медленнее, чем на персональном компьютере. Если же говорить о гладких траекториях, то для их построения понадобится вероятно более 1-2 секунд, что может быть неприемлемо в ряде практических задач. Вопросом, требующим дальнейшего исследования, является вопрос корректного измерения время выполнения алгоритма при условии того, что операционная система вносит определенные (или неопределенные?) временные задержки.

1. Harabor, D., and Grastien, Al. 2011. Online graph pruning for pathfinding on grid maps. In AAAI.
2. Uras, T.; Koenig, S.; and Hernandez, C. 2013. Subgoal graphs for optimal pathfinding in eight-neighbor grids. In Proceedings of the International Conference on Automated Planning and Scheduling.

3. Uras, T., and Koenig, S. 2015. An Empirical Comparison of Any-Angle Path-Planning Algorithms. In Proceedings of Eighth Annual Symposium on Combinatorial Search.
4. Dolgov, D., Thrun, S., Montemerlo, M., and Diebel, J. 2010. Path planning for autonomous vehicles in unknown semi-structured environments. The International Journal of Robotics Research, 29(5): 485-501.
5. Kim, H., Kim, D., Shin, J.U., Kim, H., and Myung, H. 2014. Angular rate-constrained path planning algorithm for unmanned surface vehicles. Ocean Engineering 84: 37–44.
6. Kuwata, Y., Karaman, S., Teo, J., Frazzoli, E., How, J. P., and Fiore, G. 2009. Real-time motion planning with applications to autonomous urban driving. IEEE Transactions on Control Systems Technology 17(5): 1105-1118.
7. Sturtevant, N. 2012. Benchmarks for grid-based pathfinding. Transactions on Computational Intelligence and AI in Games 4(2): 144 – 148.
8. Behnck, L. P., Doering, D., Pereira, C. E., and Rettberg, A. 2015. A Modified Simulated Annealing Algorithm for SUAVs Path Planning. IFAC-PapersOnLine, 48(10), 63-68.
9. Betthauser, J., Benavides, D., Schornick, J., O'Hara, N., Patel, J., Cole, J., and Lobaton, E. 2014. WolfBot: A distributed mobile sensing platform for research and education. In Proceedings of IEEE 2014 Zone 1 Conference of the American Society for Engineering Education, 1-8.
10. Brock, J. D., Bruce, R. F., and Cameron, M. E. 2013. Changing the world with a Raspberry Pi. Journal of Computing Sciences in Colleges, 29(2): 151-153.
11. Yakovlev, K., Baskin, E., and Hramoin, I. 2015. Grid-based angle-constrained path planning. In Proceedings of 38th Annual German Conference on Artificial Intelligence, 208-221.
12. Hart, P.E., Nilsson, N.J., and Raphael, B. 1968. A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths. IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics 4(2): 100–107
13. Nash, A., Daniel, K., Koenig, S., and Feiner, A. 2007. Theta*: any-angle path planning on grids. In Proceedings of the 22nd national conference on Artificial intelligence, 1177-1183.

A.E. Gavrilov

OBTAINING A LAWS OF MOTION FOR WALKING MOBILE ROBOT OCTOPOD-1*

Volgograd State Technical University, Volgograd
gavrilov@vstu.ru

Introduction

Creating new powerful computing systems became possible precise control of the complicated electromechanical actuators. Mankind has learned to solve a number of tasks and to perform a large number of works with the help of robots. As compared to human labor, the use of robotic tools for solving various problems in special conditions has many advantages. The robots do the work faster with minimal errors with lower financial cost and with greater efficiency than people. Therefore, the widespread introduction of robotic systems to perform a variety work and technological operations becomes a priority for development [1].

The problem of saving the planet's ecology is an important and difficult task for all countries, without exception [2]. Saving the environmental situation includes a plurality of interconnected and difficult to formalize problems. To solve these problems should be created expert systems for the accumulation and analysis of information about the environment changes. Currently, using different methods for monitoring, assessment and prediction of environmental changes under the influence of natural and anthropogenic factors [2,3]. To identify the ecological status and sampling in different areas are organized expeditions to remote areas, using analytical researches, etc. Conducting expeditions not profitable financially and in future does not always pay off. To identify the fundamental laws, environmental information must be obtained continuously for a long period of time. Carrying out long expeditions for permanent obtain information and conduct measurements of interest factors not economically reasonable because of the geographic remoteness and inaccessibility of the monitoring locations. One possible solution to this problem could be the use of autonomous mobile robotic tools to perform work assotiated to environmental monitoring and control of the environment.

*This work was supported by The Russian Foundation for Basic Research – grant №15-08-04166, grant №15-41-02578, grant №16-38-00755.

Wheeled and Caterpillar Robot Movers

Currently in the world for use in a mobile robot used wheeled and caterpillar mover. However, during the operation may cause situations where the operation of the mobile robot with wheeled and tracked propulsion very difficult, and sometimes impossible. When working under extremely difficult conditions (in swamp soil, ice, quick sand, off-road, and others.) Conventional wheeled and tracked propulsion devices do not provide normal passability, in these cases it is necessary to use a specially designed propulsor devices. Walking movers are specially designed propulsor.

Mathematic Model of Robotic Platform

Developed the mathematical model of the robot "Octopod-1" [4] with 8-legged walking mover, a kinematic scheme of which is shown in Figures 1 and 2.

If we take the number of *k* mechanism units, the total number of degrees of freedom to a compound in the kinematic chain is equal to *6k*. When marking the existing kinematic pairs as a single class p_i (*i* - class number), the number of conditions imposed by connection $\sum_{i=1}^{5} ip_i$, and the number of degrees of freedom is

$$N = 6k - \sum_{i=1}^{5} ip_i \tag{1}$$

If one of the links is considered fixed, the number of degrees of freedom is

$$N = 6n - \sum_{i=1}^{5} ip_i \tag{2}$$

Where, $n = k - 1$ - number of movable units; k - the number of links of the kinematic chain. Number of generalized coordinates is determined by the structural formula (2). Thus, the number of degrees of freedom of each mechanical limb is equal to

$$N = 6k - \sum_{i=1}^{5} ip_i = 6 \cdot 2 - (4 + 5) = 3 \tag{3}$$

Number of limbs (unclosed kinematic chains) is eight. In this case total number of degrees of freedom of the robotic platform is 24. Pivot and progressive couples the fifth grade, providing relative movement between the top and bottom frames are added the 3 degrees of freedom. Pivot joint and progressive couples the fifth grade, providing relative movement between the top and bottom frames added to robot 3 degrees of freedom more.

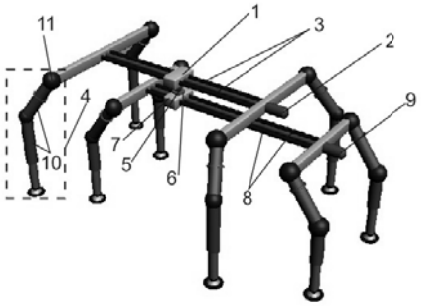


Figure 1 - Kinematic scheme of walking mover "Octopod-1". 1 - the case of the top frame, 2 - drive the horizontal movement of the upper frame, 3 - rails the upper frame, 4 - limb, 5 - vertical rotational pair of fifth grade, 6 - drive rotating frame, 7 - the case of the bottom frame, 8 - rail the lower frame, 9 - drive horizontal movement of the bottom frame

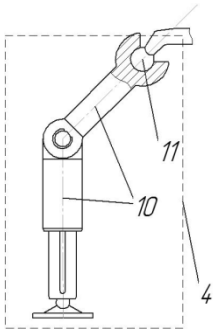


Figure 2 – Kinematic scheme of leg of walking mover "Octopod-1". 10 - units of an open kinematic chain associated by rotational pair of fifth grade, 11 - rotational spherical join.

Thus, the total number of degrees of freedom is 27. This robot design with octopus walking mover can be represented as a multi-link mechanical system. Scheme of mathematical model of robot is shown at Figure 3.

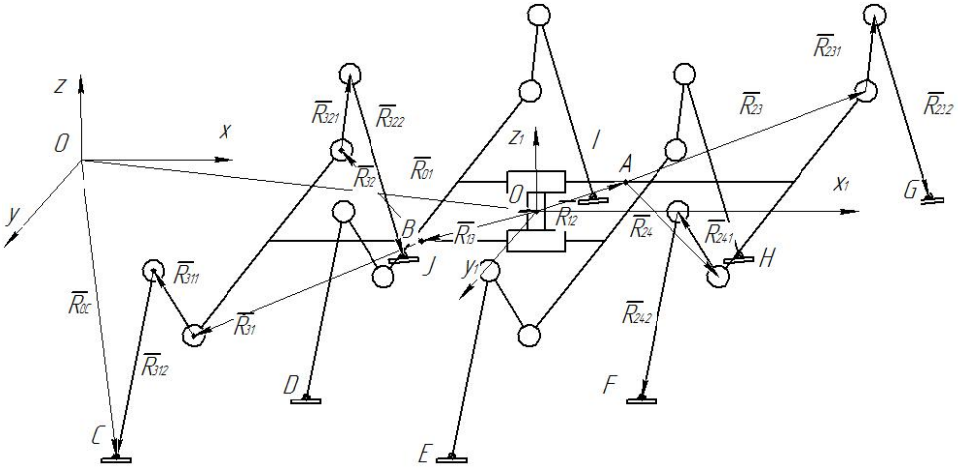


Figure 3 - Scheme of mathematical model of "Octopod-1"

A mathematical model of the robot is represented as a mechanical system relative to the fixed coordinate system *0XYZ* with the geometric center of the body of the robot shown in Figure 3, the coordinate system associated $0X_1Y_1Z_1$.

The relative position of the center of the moving coordinate system is defined by the radius-vector $\overrightarrow{R_{01}}$. Position the upper and lower parts relative to the body of the robot determined by the $\overrightarrow{R_{12}}$ и $\overrightarrow{R_{13}}$ vectors. Thus the position of foothold point for each leg in the moving coordinate system is defined as the geometrical sum of the five vectors. For the first leg of the bottom frame such a sum can be written as

$$\overrightarrow{R_{0C}} = \overrightarrow{R_{01}} + \overrightarrow{R_{13}} + \overrightarrow{R_{31}} + \overrightarrow{R_{311}} + \overrightarrow{R_{312}} \quad (4)$$

The clear position of the parts robot in the immovable coordinate system described by a system of eight vector equations:

$$\begin{cases} \overrightarrow{R_{0C}} = \overrightarrow{R_{01}} + \overrightarrow{R_{13}} + \overrightarrow{R_{31}} + \overrightarrow{R_{311}} + \overrightarrow{R_{312}} \\ \overrightarrow{R_{0J}} = \overrightarrow{R_{01}} + \overrightarrow{R_{13}} + \overrightarrow{R_{32}} + \overrightarrow{R_{321}} + \overrightarrow{R_{322}} \\ \overrightarrow{R_{0H}} = \overrightarrow{R_{01}} + \overrightarrow{R_{13}} + \overrightarrow{R_{33}} + \overrightarrow{R_{331}} + \overrightarrow{R_{332}} \\ \overrightarrow{R_{0E}} = \overrightarrow{R_{01}} + \overrightarrow{R_{13}} + \overrightarrow{R_{34}} + \overrightarrow{R_{341}} + \overrightarrow{R_{342}} \\ \overrightarrow{R_{0D}} = \overrightarrow{R_{01}} + \overrightarrow{R_{12}} + \overrightarrow{R_{21}} + \overrightarrow{R_{211}} + \overrightarrow{R_{212}} \\ \overrightarrow{R_{0I}} = \overrightarrow{R_{01}} + \overrightarrow{R_{12}} + \overrightarrow{R_{22}} + \overrightarrow{R_{221}} + \overrightarrow{R_{222}} \\ \overrightarrow{R_{0G}} = \overrightarrow{R_{01}} + \overrightarrow{R_{12}} + \overrightarrow{R_{23}} + \overrightarrow{R_{231}} + \overrightarrow{R_{232}} \\ \overrightarrow{R_{0F}} = \overrightarrow{R_{01}} + \overrightarrow{R_{12}} + \overrightarrow{R_{24}} + \overrightarrow{R_{241}} + \overrightarrow{R_{242}} \end{cases} \quad (5)$$

In the formation of the mathematical model used the following assumptions:

1. The mechanical system consists of rigid bodies.
2. Mechanical units has ideal connection.
3. The parameters of the robot, including mechanical length units are known.
4. The angles of relative rotation of links known and determined by the data obtained by sensors system.
5. The robot moves along the undeformable absolutely rigid flat surface coincides with the plane X0Y stationary coordinate system.
6. The robot is in the gravity field, the direction of gravity coincides with the normal to the surface X0Y.
7. The mass of the robot units are not included.

Creating schemes design of robot with walking mover applied block-modular design method of electromechanical structures. Method based on applied unified automated electric drives with programmable

microcontrollers. Similar schemes are used to build constructions of mobile robots and control systems of multi-motor electric machines and typical groups units of technological and transport equipment, automated technological complexes of basic industrial branches. Block-module principle allows to increase the repairability of the whole system, quickly replace defective modules are standardized, to rebuild their structure, to create robotic schemes with flexible functionality, ensuring the rational using of information resources and energy. Under the current system, all robotic units performed with compatible interface, consistent in the parameters and characteristics, similar in design and unified commutation devices. Blocks are created by installation and switching separate modules, which in turn are assembled from individual parts and components.

Each leg of mover is a mechanism with unclosed kinematic chain, consisting of several basic units connected together by hinges and one free end link. Free link allow to choose the place of standing support legs inside reachability area of leg mechanism. This increases the adaptation abilities of mobile robotic systems constructed on the basis of walking mover in comparison to other movers. The units are linked translational and rotational pairs of fifth grade. Relative movement of the robot units occurs by controlled movement of drive motors with gear mechanisms are designed as a module containing a motor-gear unit, a set of sensors and feedback control microcontroller. Each module is controlled by the electronic computer unit that performs calculation software movement laws for each drive, depending on the route of movement given by the operator on the basis of information received from the feedback system.

Robot leg kinematics is calculated by the methods of theoretical mechanics. Kinematic scheme allows an infinite number of algorithms of movement the foothold point terminal managers walking machine between two points in space. Became opened question of selection algorithm move from the point of view of different optimality criteria. For example, the criterion could be responsible for the loss in electric overhead associated with heating coils. The heating of the electrical drive, heat loss is proportional to the square of the amperage current, and therefore proportional to the square of the load on the motor. In the case where the known boundary conditions at the ends of the required function of such a functional can be written as [5,6]:

$$I_{heat} = \alpha \int_{t_1}^{t_2} \left[F_{drive}^2(t) \right] dt \,, \tag{6}$$

Where, I_{heat}- optimality criterion; α - proportionality factor, F_{drive} - force in the drive motor.

The task of finding of the required function minimizes the function solved by the methods of classical variational calculus, with, depending on the boundary conditions, gives possible to obtain different laws when moving the link between two points in space. There are various theoretical methods for finding movement laws of the actuators according to the required law of motion of the robot in the fixed system of coordinates 0XYZ. Such laws are determined by moving the methods of analytical mechanics.

For experimental verification of theoretical laws the experimental device is created (Figure 4). The device consists of a personal computer, two analog-to-digital converters «Mastech» 1, digital output for connection to a PC, the bracket 2, potentiometers 3, two units of variable length 4, the support cone 5. The units are interconnected and are mounted on a bracket, via potentiometer shaft and bush.

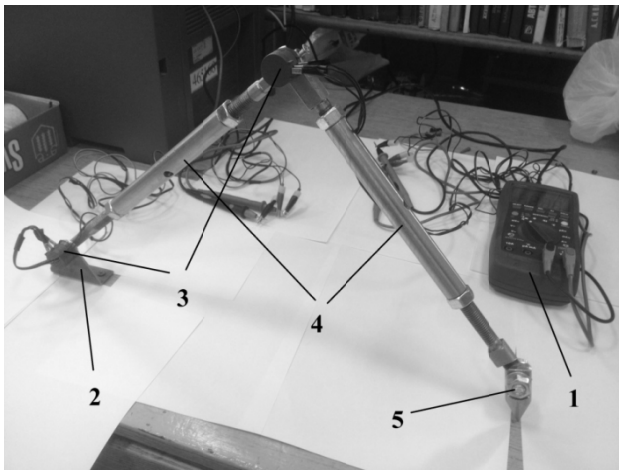


Figure 4 - An experimental device. 1 - digital multimeter, 2 - bracket, 3-potentiometers, 4 - units of variable length, 5 - bearing cone

ADC has the ability to read the signals from analog sensors with high frequency, it increases the accuracy of laws of motion of the robot units. When the support cone are moving between two given points in space the angular position of the robot units is changing, it changing proportional corresponds with a potentiometer resistance. The resistance data changing of the potentiometer, depending on the position of the support cone are transmitted by analog-digital converters to a computer. Different moving the support cone between two points gives possible to obtain a family of curves that characterize the variety of algorithms for moving limbs 8-legged mover. With the help of experimental device movement laws of individual units walking mechanism is obtained. This became possible obtaining simulation program laws of robot generally. Device simulates the motion of each of the eight limbs of mover, each of which consists of a units connected by spherical and cylindrical joints [6].

Conclusion

Development of walking machines and robots is hampered by difficulty dynamic links components of motion of walking robot with many drives, lack of mobile power plants small mass. Walking transport robots and devices are new and not fully investigated. Movers such designing are promising to use as ground and underwater transport and technological complexes, robotic systems for environmental monitoring, humanitarian demining, for discovering of other planets and application in space technology.

Acknowledgment

The author would like to thank the Volgograd State Technical University for making available conducting research.

1. A.E. Gavrilov, A.S. Danshin, A.A. Burhanov, “Autonoumus robotic walking platform for environmental monitoring,” News of volgograd state technical university, vol. 12(139), Volgograd, 2014, pp. 153-157.
2. U.A. Israel, Ecology and environmental control, 3rd ed. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1979, p.367.
3. A.K. Murtazov, Environmental monitoring, 1st ed., Ryazan, (2008), p. 146.
4. Patent 154555 RF, МПКВ62D57/02. Walking insect-legged mover/ V.V. Arykancev, A.E. Gavrilov, Y.V Kalinin, A.V. Leonard, N.G. Sharonov; Volgograd state technical university (2015)
5. Gavrilov, A.E., Zhoga, V.V., Fedchenkov, P.V., “Synthesis of optimal program law for movement os a robot with ortogonal walking drives,” (2011) *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 50 (5), pp. 847-857.
6. Zhoga, V., Gavrilov, A., Gerasun, V., Nesmianov, I., Pavlovsky, V., Skakunov, V., Bogatyrev, V., Vorobieva, N., “Walking mobole robot with manipulator-tripod” (2014) *Mechanisms and Machine Science*, 22, pp. 463-471.

А.Е. Гаврилов

ПОЛУЧЕНИЕ ЗАКОНОВ ПРОГРАММНЫХ ДВИЖЕНИЙ МОБИЛЬНОГО ШАГАЮЩЕГО РОБОТА ОКТОПОД-1*

Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград
gavrilov@vstu.ru

В результате появления новых мощных вычислительных систем стало возможным точное управление сложными электромеханическими исполнительными механизмами. В результате человечество научилось решать ряд задач и выполнять большое количество работ с помощью роботов. Применение робототехнических средств, для решения различных задач в особых условиях, по сравнению с человеческим трудом, имеет ряд преимуществ. Роботы выполняют работу быстрее и с меньшими погрешностями чем человек, с меньшими финансовыми затратами, и с большей производительностью. Поэтому, повсеместное внедрение робототехнических систем для выполнения различных работ и технологических операций становится приоритетным направлением развития[1].

Проблема сохранения экологии планеты является важной и сложной задачей для всех стран мира, без исключения [2]. Сохранение экологической ситуации включает в себя решение множества взаимосвязанных, трудно формализуемых задач. Для решения подобных задач необходимо создание экспертных систем для накопления и анализа информации об окружающей среде.

В настоящее время для наблюдения, оценки и прогноза изменений состояния окружающей среды под воздействием природных и антропогенных факторов, используются различные методы [2,3]. Для выяснения экологического состояния, снятия проб в зараженных и опасных областях организуются экспедиции в труднодоступные районы, проводятся аналитические исследования и т.д. Проведение

*Работа выполненна при поддержке РФФИ проекты: №15-08-04166, №15-41-02578, №16-38-00755.

экспедиций является не выгодным в финансовом отношении и впоследствии не всегда окупается. Проведение экспедиций, помимо экономических затрат, носит временный характер, а для выявления фундаментальных закономерностей, информацию об окружающей среде необходимо получать постоянно, в течение длительного периода времени. Проведение длительных экспедиций для постоянного круглогодичного получения информации и проведения замеров интересующих показателей также экономически не обосновано из-за географической удаленности и труднодоступности мест мониторинга. Одним из возможных решений данной проблемы может стать применение мобильных автономных робототехнических средств, для выполнения работ связанных с экологическим мониторингом и контролем за состоянием окружающей среды. На данный момент в мире для использования в мобильных робототехнических комплексах применяются колесные и гусеничные движители. Однако, в процессе эксплуатации возможно появление ситуаций, когда работа мобильных роботов с колесными и гусеничными движителями сильно затруднена, а порой и невозможна. При работе в особо трудных условиях (на болотистых почвах, на льду, сыпучем песке, бездорожье и др.) обычные колесные и гусеничные движители не обеспечивают нормальной проходимости, в этих случаях необходимо использовать движители специальной конструкции. К таким движителям относятся в т.ч. и шагающие движители.

Разработана математическая модель робота «Октопод-1» [4] с инсектоморфным шагающим движителем, кинематическая схема которого представлена на рисунках 1 и 2.

Если принять за k число звеньев механизма, то общее количество степеней свободы до соединения в кинематическую цепь равно $6k$. При обозначении имеющихся кинематических пар одного класса как p_i (i – номер класса), число накладываемых условий связи $\sum_{i=1}^{5} ip_i$, а число степеней свободы

$$N = 6k - \sum_{i=1}^{5} ip_i \tag{1}$$

Если одно из звеньев считается неподвижным, то число степеней свободы

$$N = 6n - \sum_{i=1}^{5} ip_i \tag{2}$$

Где, $n = k - 1$ - число подвижных звеньев, k - число звеньев кинематической цепи, Число обобщенных координат определяется структурной формулой (2). Таким образом, число степеней свободы каждой механической конечности будет равным

$$N = 6k - \sum_{i=1}^{5} ip_i = 6 \cdot 2 - (4+5) = 3, \tag{3}$$

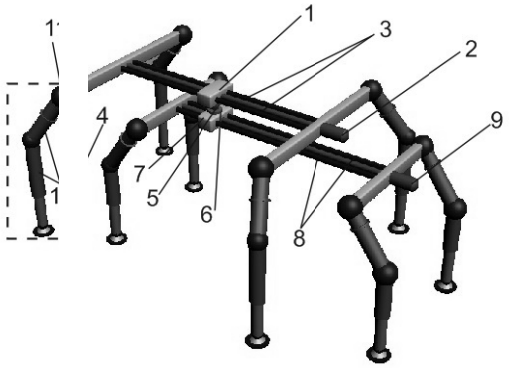


Рисунок 1 – Кинематическая схема шагающего инсектоморфного движителя «Октопод-1»
1 – корпус верхней рамы, 2 – привод горизонтального перемещения верхней рамы, 3 – направляющие верхней рамы, 4 – конечность инсектоморфного движителя, 5 – вертикальная вращательная пара пятого класса, 6 – привод поворота рам, 7 - корпус нижней рамы, 8 - направляющие нижней рамы, 9 - привод горизонтального перемещения нижней рамы

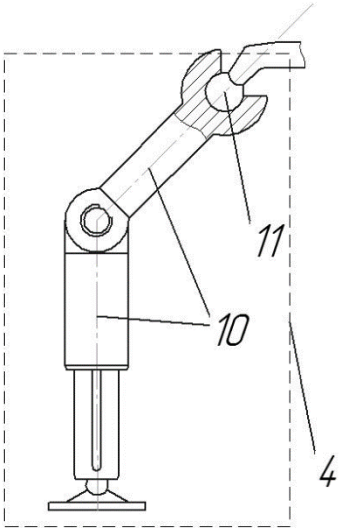


Рисунок 2 - Кинематическая схема ноги шагающего инсектоморфного движителя «Октопод-1» 9 – звенья незамкнутой кинематической цепи связанные вращательной парой пятого класса, 10 – вращательная пара четвертого класса

Общее число степеней свободы механизма при условии наличия в инсектоморфном движителе восьми конечностей представляющих собой незамкнутую кинематическую цепь, в таком случае, равно 24. Поворотный шарнир и поступательные пары пятого класса, обеспечивающие относительное перемещение верхней и нижней рам добавляют механизму 3 степени свободы. Таким образом, общее число степеней свободы 27.

Подобная конструкция робота с инсектоморфным шагающим движителем может быть представлена как многозвенная механическая система. Схема математической модели робота представлена на рисунке 3.

Математическая модель робота представляется в виде многозвенной механической системы относительно неподвижной системы координат *0XYZ*, с геометрическим центром корпуса робота показанном на рисунке 3, связана система координат $0X_1Y_1Z_1$.

Относительное положение центра отсчета подвижной системы координат определяется радиус-вектором $\overrightarrow{R_{01}}$. Положение верхней и нижней частей робота относительно корпуса определяется векторами $\overrightarrow{R_{12}}$ и $\overrightarrow{R_{13}}$ соответственно. Определить их возможно зная геометрические параметры механической конструкции и координату x_1 точек *A* и *B*. Из известных заранее геометрических параметров конструкции однозначно определяются векторы $\overrightarrow{R_{31}}$ и $\overrightarrow{R_{32}}$. Таким образом положение опорной точки каждой ноги в подвижной системе координат определяется геометрической суммой пяти векторов. Для первой ноги нижней рамы такая сумма запишется в виде

$$\overrightarrow{R_{0C}} = \overrightarrow{R_{01}} + \overrightarrow{R_{13}} + \overrightarrow{R_{31}} + \overrightarrow{R_{311}} + \overrightarrow{R_{312}} \qquad (4)$$

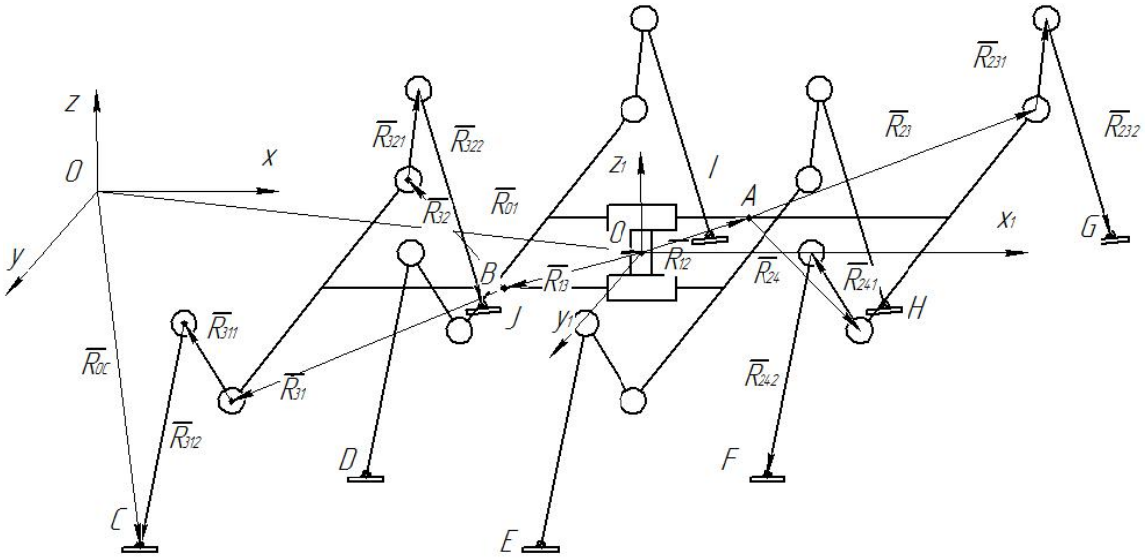


Рисунок 3 –Схема инсектоморфного движителя «Октопод -1»

Однозначное положение робота в неподвижной системе координат описывается системой из восьми векторных уравнений:

$$\begin{cases} \overrightarrow{R_{0C}} = \overrightarrow{R_{01}} + \overrightarrow{R_{13}} + \overrightarrow{R_{31}} + \overrightarrow{R_{311}} + \overrightarrow{R_{312}} \\ \overrightarrow{R_{0J}} = \overrightarrow{R_{01}} + \overrightarrow{R_{13}} + \overrightarrow{R_{32}} + \overrightarrow{R_{321}} + \overrightarrow{R_{322}} \\ \overrightarrow{R_{0H}} = \overrightarrow{R_{01}} + \overrightarrow{R_{13}} + \overrightarrow{R_{33}} + \overrightarrow{R_{331}} + \overrightarrow{R_{332}} \\ \overrightarrow{R_{0E}} = \overrightarrow{R_{01}} + \overrightarrow{R_{13}} + \overrightarrow{R_{34}} + \overrightarrow{R_{341}} + \overrightarrow{R_{342}} \\ \overrightarrow{R_{0D}} = \overrightarrow{R_{01}} + \overrightarrow{R_{12}} + \overrightarrow{R_{21}} + \overrightarrow{R_{211}} + \overrightarrow{R_{212}} \\ \overrightarrow{R_{0I}} = \overrightarrow{R_{01}} + \overrightarrow{R_{12}} + \overrightarrow{R_{22}} + \overrightarrow{R_{221}} + \overrightarrow{R_{222}} \\ \overrightarrow{R_{0G}} = \overrightarrow{R_{01}} + \overrightarrow{R_{12}} + \overrightarrow{R_{23}} + \overrightarrow{R_{231}} + \overrightarrow{R_{232}} \\ \overrightarrow{R_{0F}} = \overrightarrow{R_{01}} + \overrightarrow{R_{12}} + \overrightarrow{R_{24}} + \overrightarrow{R_{241}} + \overrightarrow{R_{242}} \end{cases} \quad (5)$$

При построении математической модели использовались следующие допущения:

1. Механическая система состоит из абсолютно твердых тел.
2. На механические звенья наложены идеальные связи.
3. Параметры робота, в т.ч. длины механических звеньев известны заранее.
4. Углы относительного поворота звеньев известны и определяются данными полученными от системы очувствления.
5. Робот перемещается по недеформируемой абсолютно жесткой плоской поверхности совпадающей с плоскостью X0Y неподвижной системы координат.
6. Робот находится в поле сил тяжести, направление силы тяжести совпадает с нормалью, проведенной к поверхности X0Y.
7. При расчете кинематики и алгоритмов перемещения, массы звеньев робота не учитываются.

При создании конструкции робота с инсектоморфным шагающим движителем применен блочно-модульный принцип построения электромеханических структур на базе унифицированных автоматизированных электроприводов с программируемыми микроконтроллерами. Блочно-модульный принцип позволяет повысить ремонтопригодность системы в целом, быстро заменять вышедшие из строя унифицированные модули, перестраивать их структуру, создавать робототехнические схемы с гибкими функциональными возможностями, обеспечивающие рациональное использование информационных и энергетических ресурсов. В рамках существующей робототехнической системы, все блоки выполняются совместимыми по интерфейсу т.е. совместимыми по параметрам и характеристикам носителей информации, похожими по конструктивному исполнению, с унифицированными устройствами коммутации. Блоки создаются посредством монтажа и коммутации отдельных модулей, которые, в свою очередь собираются из отдельных деталей и узлов.

Каждая нога инсектоморфного движителя является пространственным механизмом, представляющим собой незамкнутую кинематическую цепь, состоящую из нескольких базисных звеньев соединенных между собой шарнирами и одного свободного концевого звена. За счет наличия свободного звена появляется возможность выбора мест постановки опорных стоек в пределах зоны достижимости механизма ноги. Это расширяет адаптационные возможности мобильных робототехнических систем построенных на базе шагающего инсектоморфного движителя в сравнении с другими движителями. Звенья связаны между собой поступательными и вращательными парами пятого класса. Относительное перемещение звеньев робота происходит за счет управляемого движения приводных электродвигателей с передаточными механизмами, выполненными в виде модуля содержащего в себе электродвигатель, редуктор, набор датчиков обратной связи и управляющий микроконтроллер. Каждый модуль управляется посредством электронно-вычислительного блока, выполняющего вычисление законов программных движений для каждого привода в зависимости от задаваемого оператором маршрута движения на основании информации полученной от системы датчиков обратной связи.

Кинематика движения ноги инсектоморфного робота рассчитывается с помощью методов теоретической механики [5,6]. При перемещении каждой из восьми ног, кинематическая схема инсектоморфного движителя допускает бесконечное число алгоритмов перемещения опорной точки концевого звена шагающего аппарата между двумя точками пространства. В связи с этим встает вопрос выбора алгоритма перемещения с точки зрения различных критериев оптимальности. Например, в качестве такого критерия может служить критерий, отвечающий за непроизводительные потери в электродвигателях связанные с нагревом обмоток. Нагрев двигателя, а, следовательно,

тепловые потери пропорциональны квадрату тока якоря, и, следовательно, пропорциональны квадрату нагрузки на электродвигатель. В случае, когда известны граничные условия на концах искомой функции, при перемещении опорной точки ноги шагающего аппарата, такой функционал можно представить в виде[7,8]:

$$I = \alpha \int_{t_1}^{t_2} \left[F_{дв.}^2(t) \right] dt, \tag{6}$$

где I – критерий оптимальности, α - коэффициент пропорциональности, $F_{дв}$– усилие в приводном электродвигателе.

Задача нахождения искомой функции доставляющей минимум функционалу решается методами классического вариационного исчисления, при этом, в зависимости от граничных условий, возможно получение различных законов при перемещении опорного звена между двумя точками пространства.

Существуют различные теоретические методы нахождения программных законов движения исполнительных механизмов в зависимости от требуемого закона перемещения робота в неподвижной системе координат *0XYZ*. Такие законы перемещения определяются методами аналитической механики.

Для экспериментальной проверки полученных теоретических законов изменения углов относительного поворота звеньев ноги шагающего инсектоморфного движителя, в зависимости от траектории движения опорной точки механизма, создан экспериментальный стенд. Стенд состоит из персонального компьютера, двух аналого-цифровых преобразователей «Mastech» 1 с цифровым выходом для подключения к ПК, кронштейна 2, потенциометров 3, двух звеньев переменной длины 4, опорного конуса 5. Звенья соединяются между собой, а также крепятся на кронштейне, с помощью втулок и вала потенциометра.

АЦП имеет возможность снимать показания аналоговых датчиков с высокой частотой, что повышает точность полученных программных законов движения звеньев робота. При перемещении опорного конуса между двумя заданными точками пространства изменяется угловое положение звеньев робота, чему соответствует пропорциональное изменение сопротивления потенциометра. Данные об изменяющемся сопротивлении потенциометра, в зависимости от положения опорного конуса, передаются с помощью аналогово-цифровых преобразователей на компьютер. По данным датчиков строятся графики зависимости изменения углов положения от времени или координаты. При перемещении опорного конуса между двумя точками возможно получение семейства кривых, характеризующих многообразие алгоритмов перемещения конечности инсектоморфного движителя.

С помощью экспериментального стенда строятся законы программного перемещения отдельных звеньев механизма шагания, а также проводится моделирование движения всего робота. Стенд моделирует движение каждой из восьми конечностей инсектоморфного движителя, каждая из которых состоит из шарнирного двухзвенника, соединенного с корпусом сферическим шарниром, на свободном конце которого закреплена опорная плита [5,6]. Фото стенда показано на рисунке 4.

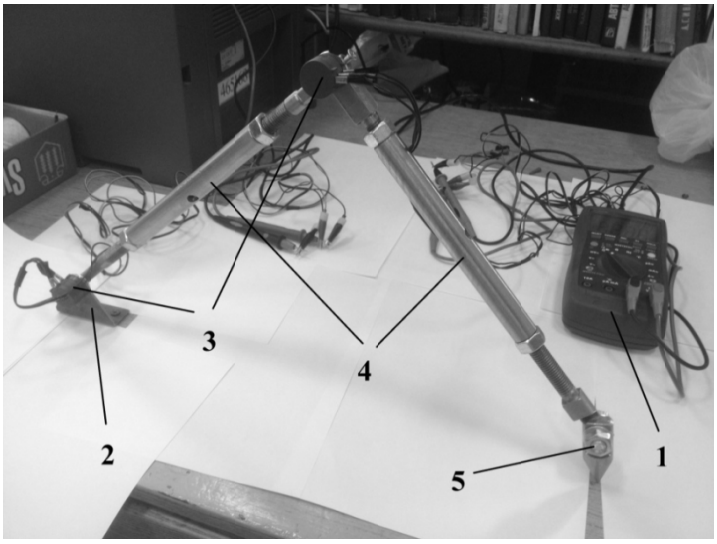


Рисунок 4 – Экспериментальный стенд, 1-мультиметр, 2-кронштейн, 3- потенциометры, 4-звенья переменной длины, 5-опорный конус

Разработки шагающих машин и роботов затруднены сложностью динамических взаимосвязей составляющих движения шагающего робота со многими приводами, отсутствием мобильных энергетических установок небольшой массы, а также отсутствием теории оптимального движения шагающих аппаратов. Шагающие инсектоморфные движители являются новыми и полностью не исследованы. Перспективы развития таких систем обусловлены нахождением оптимальных с точки зрения энергозатрат алгоритмов перемещения. Движители подобной конструкции перспективны для применения в многофункциональных наземных и подводных транспортно-технологических комплексах, робототехнических системах для экологического мониторинга, гуманитарного разминирования, а также для исследования других планет и применения в космической технике.

1. Гаврилов, А.Е. Автономная роботизированная шагающая платформа для мониторинга окружающей среды / А.Е. Гаврилов, А.С. Даншин, А.А. Бурханов // Известия ВолгГТУ. Серия "Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах". Вып. 21 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. - Волгоград, 2014. - № 12 (139). - С. 153-157.
2. Израэль Ю. А. Экология и контроль состояния природной среды. - Л.: Гидрометеоиздат, 1979, — 376 с.
3. Муртазов А.К. Экологический мониторинг. Методы и средства. Учебное пособие. - Рязань, 2008. - 146 с.
4. П.м. 154555 РФ, МПК B62D57/02, B62D57/032. Шагающий инсектоморфный движитель / В.В. Арыканцев, А.Е. Гаврилов, Я.В. Калинин, А.В. Леонард, Н.Г. Шаронов; ВолгГТУ. - 2015.
5. Гаврилов, А.Е**.** Экспериментальное получение законов движения приводов ноги робота с инсектоморфным движителем / А.Е. Гаврилов // Научные исследования и разработки молодых учёных : сб. матер. IV междунар. молодёжной науч.-практ. конф. (г. Новосибирск, 22 апр. 2015 г.) / под общ. ред. С.С. Чернова ; Новосибирский гос. техн. ун-т. - Новосибирск, 2015. - С. 83-87.
6. Селюнин, Д.М. Нахождение законов относительного перемещения звеньев конечности инсектоморфного робота экспериментальным путём / Д.М. Селюнин, А.Е. Гаврилов // Сборник тезисов докладов по внутривузовскому смотру-конкурсу научных конструкторских и технологических работ студентов (г. Волгоград, 12-15 мая 2015 г.) / ВолгГТУ, Совет СНТО. - Волгоград, 2015. - С. 139-140.
7. Гаврилов, А.Е. Синтез оптимального по энергозатратам закона движения ортогонального шагающего робота / А.Е. Гаврилов // Вестник Волгоградского гос. ун-та. Серия 9, Исследования молодых учёных. - 2010. - Вып. 8, ч. 2. - С. 118-123.
8. Гаврилов, А.Е. Синтез оптимального программного закона перемещения робота с ортогональными шагающими движителями / А.Е. Гаврилов, В.В. Жога, П.В. Федченков // Известия РАН. Теория и системы управления. - 2011. - № 5. - С. 164-173.

M.B. Ignatyev, D.V. Kuzmin, Y.A. Popov

OBSTACLES OVERCOMING PATTERNS FOR STEPPING ROBOTS

St-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation
ignatmb@mail.ru

Abstract

In a lecture patterns are examined for overcoming of obstacles stepping robots - 2-leggs, 4-leggs, 6-leggs and octopod. Every pattern is begun with an initial pose, which a robot must accept for overcoming of obstacles – ditch, fence, narrowity and stair.

Key words: stepping machines, overcoming of obstacles, patterns.

М.Б. Игнатьев, Д.В. Кузьмин, Ю.А. Попов

ПАТТЕРНЫ ПРЕОДОЛЕНИЯ ПРЕПЯТСТВИЙ ШАГАЮЩИМИ РОБОТАМИ

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения
ignatmb@mail.ru

Аннотация

В докладе рассматриваются паттерны для преодоления препятствий шагающими роботами - двуногими, четырехногими, шестиногими и восьминогими. Каждый паттерн начинается с исходной позы, которую робот должен принять для преодоления препятствий – рва, забора, узости и лестницы.

Ключевые слова: шагающие роботы, преодоление препятствий, паттерны.

Построено довольно много алгоритмов перемещения шагающих машин по ровной поверхности [1,2, 3, 4]. Но наибольший интерес представляет использование шагающих машин для преодоления препятствий типа ров, стенка, лестница, преодоление узостей и др. и использование объектно-ориентированного программирования, то есть построение специальных паттернов для преодоление препятствий. Любой паттерн описывает задачу, которая снова и снова возникает при функционировании шагающей машины, а также принцип ее решения, причем таким образом, чтобы это решение можно потом использовать многократно[5].

Прежде чем перемещаться по пересеченной местности, робот должен оценить проходимость маршрута из точки А в точку Б, оценить сложность преодоления препятствий исходя из априорной информации о местности, исходя из информации от различных датчиков – визуальных, радиолокационных и от беспилотников и выстроить цепочку паттернов, необходимых для перемещения по выбранному маршруту.

Каталог паттернов:

1. Оценивание прохождения маршрута по априорной информации.

Название	**Описание**
path	паттерн представляет собой обработку уже полученной информации со всех датчиков шагающей машины ранее рассматриваемого момента.

2. Запуск беспилотника для сбора информации о маршруте.

Название	**Описание**
drone	паттерн должен срабатывать тогда, когда для передвижения машины недостаточно данных.

3. Обработка информации, полученной от беспилотника.

Название	**Описание**
infodrone	паттерн срабатывает сразу же после того, как паттерн запуска беспилотника закончит свою задачу и передаст информацию для обработки этому паттерну.

4. Получение визуальной информации о маршруте с помощью визуальных систем, размещенных на самом роботе.

Название	**Описание**
vizsualization	паттерн включается сразу после обработки информации, полученной с беспилотника.

5. Получение информации от радиолокационных систем, размещенных на самом роботе.

Название	**Описание**
radarlocation	паттерн срабатывает в основном при необходимости измерения и определения свойств различных объектов или же при необходимости определения собственных координат шагающей машины.

6. Оценка полученной информации и принятие решения по построению маршрута путем назначения промежуточных ориентиров.

Название	**Описание**
construction	паттерн срабатывает в том случае, когда машина начинает обладать достаточной информацией об окружающей среде (ориентиров) для оценки ситуации вокруг и построения наиболее благоприятного маршрута.

7. Паттерн перемещения по ровной поверхности

Название	**Описание**
flat_surface	паттерн срабатывает в том случае, когда машина уже произвела оценку окружающей среды, выстроила наиболее благоприятный маршрут и на этом маршруте поверхность является наиболее плоской. В данном случае машина передвигается по ровной поверхности с помощью алгоритмов управления и перемещения, в частности реализация походок.

8. Паттерн перемещения по лестнице

Название	Описание
move_the_stairs	паттерн срабатывает тогда, когда на наиболее благоприятном пути шагающей машины появляется ров. С помощью алгоритмов управления и перемещения, шагающая машина взбирается на лестницу.

9. Паттерн преодоления рва

Название	Описание
prisayanie_ditch	паттерн срабатывает тогда, когда на наиболее благоприятном пути шагающей машины появляется лестница. С помощью алгоритмов преодоления препятствий, шагающая машина преодолевает ров.

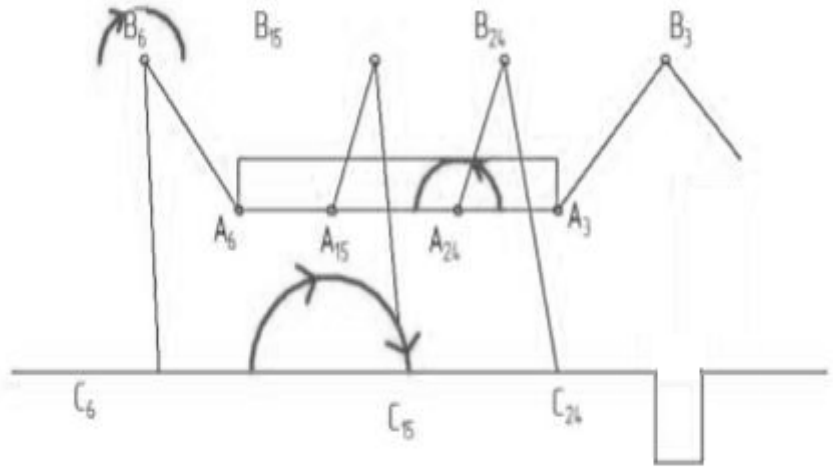


Рисунок – 1

10. Паттерн преодоления стенки

Название	Описание
prisayanie_wall	паттерн срабатывает тогда, когда на наиболее благоприятном пути шагающей машины появляется препятствие, которое машина в состоянии перешагнуть. С помощью алгоритмов преодоления препятствий, шагающая машина преодолевает выпуклое препятствие.

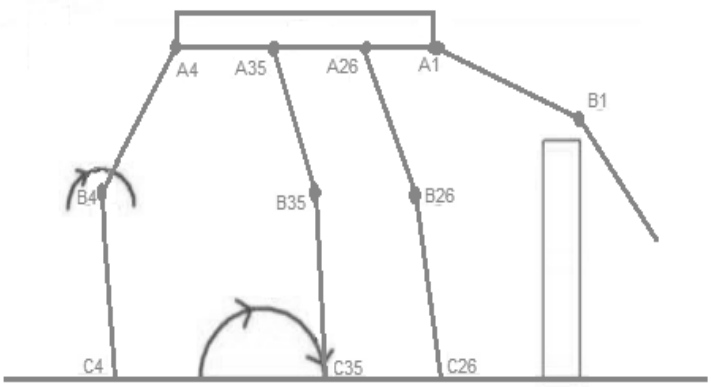


Рисунок – 2

11. Паттерн преодоления узости

Название	Описание
narrowness	паттерн срабатывает тогда, когда на наиболее благоприятном пути шагающей машины появляется узость, в которую машина в состоянии проникнуть. С помощью алгоритмов преодоления препятствий, шагающая машина преодолевает выпуклое препятствие.

12. Паттерн возвращения к задаче по оценке проходимости из новой точки.

Название	Описание
return_to_task	паттерн срабатывает тогда, когда машина сменила локацию, провела новую оценку местности и выбрала новые точки ориентиров для построения нового или корректировки старого маршрута.

Создание системы паттернов для управления шагающими роботами в различных ситуациях позволит упорядочить многочисленные исследования по шагающим машинам и разработать новые алгоритмы для преодоления препятствий.

1. М.Б.Игнатьев, Ф.М.Кулаков, А.М.Покровский "Алгоритмы управления роботами-манипуляторами" изд. Машиностроение, Л., 1972, второе издание - перевод на английский, Виргиния Пресс, 1973, третье издание, переработанное и дополненное - Машиностроение, 1977, 210 С.
2. М.Б.Игнатьев «Кибернетическая картина мира. Сложные киберфизические системы» СПб, 2014, 472 С..
3. В.Е.Павловский . О разработках шагающих машин // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2013. № 101. 32 с. URL:http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2013-101
4. М.Б.Игнатьев, С.В.Владимиров, В.И.Сапожников, М.Б.Сергеев, Д.В.Кузьмин, В.Н.Соловьев, А.В.Рыжов, Я.А.Липинский «Перспективы создания шагающих роботов» Доклад на Конференции по экстремальной робототехнике в 2015 г., Санкт-Петербург.
5. Э.Гамма, Р.Хелм, Р.Джонсон, Дж.Влисидес «Приемы объектно-ориентированного проектирования. Паттерны проектирования» СПб, Питер,2001, - 368 с.

S.V. Haruzin, A.A. Ivanov, O.A. Shmakov

SITUATIONAL CONTROL OF THE SIX-WHEEL VEHICLE WITH THE TRANSFORMED FRAME

SPbPU,CRDI RTC, Saint-Petersburg
skharuzin@yandex.ru

Abstract

Structure of control system for mobile actively transformed six-wheeled platform under the values of exteroceptive and proprioceptive sensors is discussed. Control algorithms for negotiation of relatively large obstacles are developed. Control system and algorithms give the ability to automatically negotiate sequence of unspecified obstacles to the skid-steered vehicle. Virtual simulations are performed to evaluate the efficiency of designed control law.

Keywords: mobile robotized platform, mobile robot, skid-steered vehicle, transformable platform, obstacle negotiation.

С.В. Харузин, А.А. Иванов, О.А. Шмаков

СИТУАЦИОННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ШЕСТИКОЛЁСНОЙ ПОВОЗКОЙ С ТРАНСФОРМИРУЕМОЙ РАМОЙ

СПбПУ, ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург
skharuzin@yandex.ru

Аннотация

Предложена структура системы управления по информации с экстероцептивных и проприоцептивных датчиков движением шестиколёсной платформы с активно трансформируемой рамой. Разработаны алгоритмы, обеспечивающие движение платформы в среде с препятствиями, высота которых превышает номинальные габариты устройства. Система управления и алгоритмы обеспечивают преодоление произвольной последовательности типовых препятствий в автоматическом режиме. Проведено виртуальное апробирование разработанных алгоритмов и продемонстрирована их эффективность.

Ключевые слова: мобильная роботизированная платформа, мобильный робот, шестиколесная повозка, трансформируемая рама, преодоление препятствий.

Повозка на колёсах с независимыми приводами и активно трансформируемой рамой является одним из конструктивных решений, направленных на создание вездеходных роботов,

функционирующих в сложноструктурированной среде с пространственными препятствиями, размер которых превышает габариты колёс или номинальные габариты устройства. Условия эксплуатации таких роботов, как правило, не допускают визуальный внешний контроль оператором, поэтому принятие решений по выбору режимов движения и конфигурации мобильной платформы должно быть автоматизировано. Целью работы является разработка структуры и алгоритмов системы управления автономным движением в среде с пространственными препятствиями робота на колёсной платформе с трансформируемой рамой.

Обеспечивающая движение с преодолением препятствий система управления робота содержит блоки в соответствии со схемой на рисунке 1. На основе обновляемой с заданной частотой информации экстероцептивных и проприоцептивных датчиков, правил классификации препятствий и целевых функций блок генерации заданий формирует временные зависимости, задающие движение приводов в интервале обновления. Регулятор выполняет стандартную роль, формируя управляющие сигналы по рассогласованию задаваемого и наблюдаемого состояния. Минимальное число проприоцептивных датчиков соответствует числу приводов робота. Количество датчиков внешней среды (экстероцептивных) должно быть достаточным для классификации препятствий и ориентации робота. Препятствия могут быть разделены на три класса: (1) допускающие движение с пассивно адаптирующейся подвеской, (2) требующие для преодоления активную трансформацию рамы, (3) препятствия, не преодолимые при любых допустимых конфигурациях рамы платформы. Для препятствий первого и второго класса реализуются правила поведения для преодоления типовых препятствий. В третьем классе реализуются алгоритмы остановки и возврата в номинальное состояние.

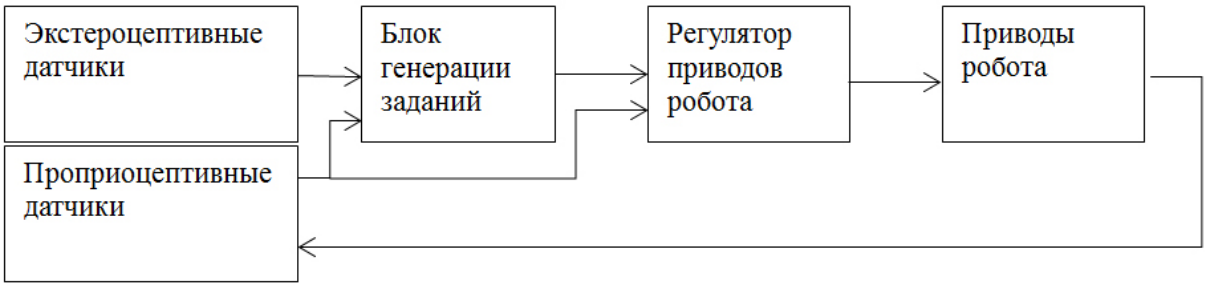


Рисунок 1 – Структурная схема системы управления трансформируемой платформы

Сформулированные положения реализованы в системе управления платформой (см. рисунок 2(а)), состоящей из трёх двухколёсных модулей (поз. 1-3) с независимыми приводами (поз. 4-9), объединённых трансформируемой рамой. С помощью приводов поступательных шарниров на переднем и заднем модулях (поз. 1, 3) расстояние от их мостов до моста среднего модуля (поз. 3) может увеличиваться на 33% от номинального расстояния. Привод шарнира вращения на среднем модуле обеспечивает излом рамы, поворачивая передний модуль вокруг оси своего моста в диапазоне ±90º. Поворот платформы осуществляется по танковой схеме заданием угловых скоростей колёс. В рамках настоящей работы рассматривается подход к управлению движением платформы на полосе плоских типовых препятствий (плавный рельеф, эскарп, обрыв и ров) с использованием трёх зафиксированных на модулях дальномеров (см. рисунок 2(б)) и двух двухосевых инклинометров на переднем и заднем модулях. Направления измерения дальномеров 1 и 2-3 (рисунок 2(б)) образуют с горизонтальными плоскостями модулей углы 30º и 45º соответственно.

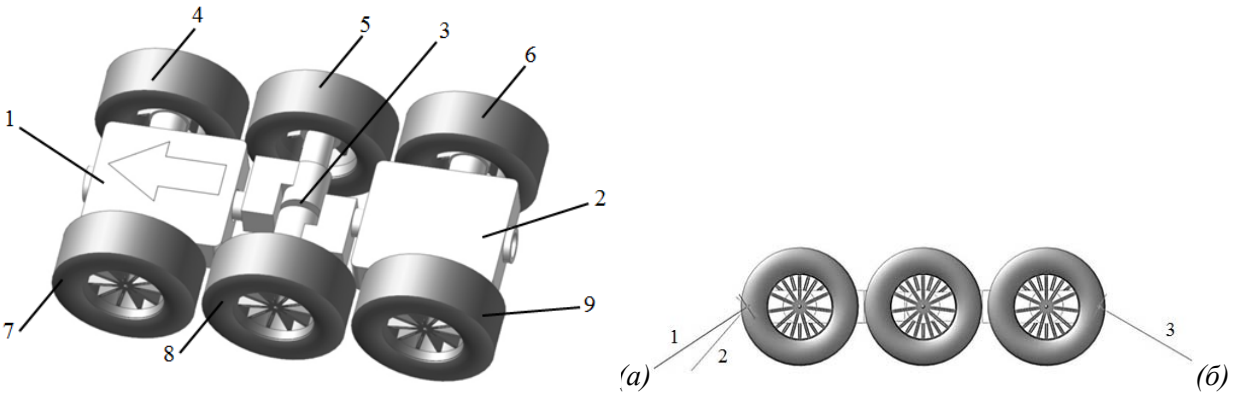


Рисунок 2 – 3DCAD-модель трансформируемой колесной платформы (*а*) и расположение дальномеров (*б*)

Движение платформы по полосе препятствий может быть разделено на этапы преодоления типового препятствия. На рисунке 3 приведены схемы конфигурации платформы в положениях переключения режимов движения.

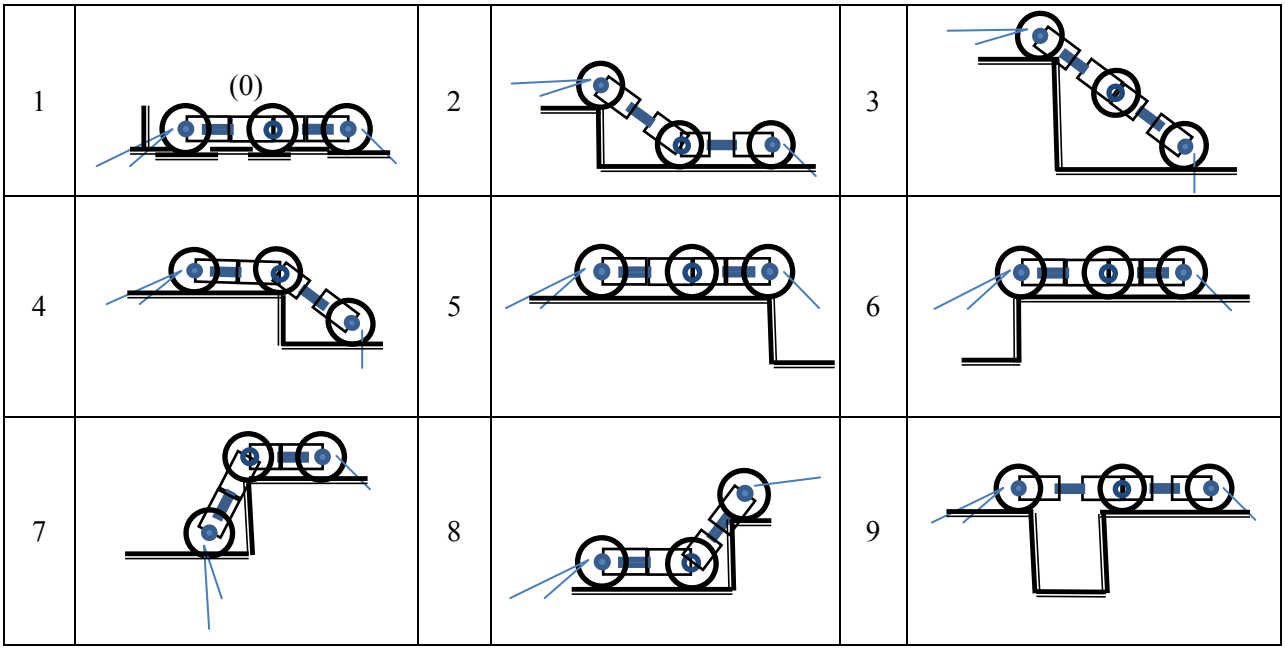


Рисунок 3 – Конфигурации платформы в характерных состояниях

Номинальным режимом движения (0) является режим по рельефу, определяемому датчиками 1-3 как «плавно меняющийся», с пассивными приводами передних и средних колёс и поворотной трансформации рамы. Обнаружение дальномером 2 препятствия на расстоянии меньшем диаметра колеса с одновременным определением препятствия дальномером 1 вызывает активную трансформацию платформы для преодоления эскарпа (положения 2-5). Достижение положения 2 определяется по резкому изменению показаний дальномеров и последующему равенству угловых скоростей колёс переднего и среднего мостов. Положение 3 достигается выпрямлением рамы и с коррекцией угловой скорости заднего привода (увеличением на величину угловой скорости в шарнире трансформации). Переход в положение 4 производится трансформацией рамы до вступления средних колёс в контакт и выхода по показаниям дальномеров 1-2 в режим (0). Выход в положение 5 обеспечивается активным передним приводом, поступательными приводами и приводом поворота рамы. По завершении перехода 4-5 форма рамы соответствует положению (0). Положение, при котором платформа находится в непосредственной близости от края спуска с эскарпа (положение 6), инициируется переход к седьмому состоянию 7. Передний и задний модули вытягиваются на длину, обеспечивающую безопасный спуск (т. е. длину, при которой возможен одновременный контакт средних колес и поверхности уступа и передних колес и опорной поверхности в непосредственной близости от уступа). При переходе от положения 7 к 8 активизируются приводы передних и средних колеса, коэффициент регулятора вращающего момента срединного шарнира уменьшается в 10 раз, что обеспечивает плавный спуск среднего моста. При определении по дальномерам 1-2 типа препятствия «ров» (расстояние до противоположного «берега» меньше номинального расстояния между мостами) происходит последовательный переход 6-9-5. Передний модуль при этом выдвигается так, чтобы расстояние между опорными точками переднего и среднего колёс равнялось ширине рва. Активными в этом случае являются приводы трансформации (режим удержания) и задних колёс. При преодолении препятствий типа спуск и ров выход в номинальный режим движения (первое описанное состояние) происходит, когда третий дальномер фиксирует наличие под задними колесами опорной поверхности. Схема возможных переходов от одного состояния к другому приведена на рисунке 4.

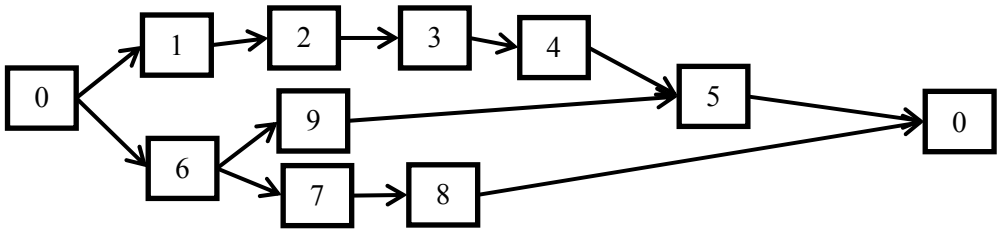


Рисунок 4 – Схема возможных переходов от одного состояния к другому

Первым этапом работы блока генерации заданий является определение текущего состояния робота. Выбор состояния происходит на основе информации о конфигурации робота и информации о геометрических параметрах подстилающей поверхности – каждому состоянию соответствует свой диапазон значений показаний оптических дальномеров, инклинометров и датчиков, определяющих конфигурацию платформы. Затем в соответствии с законами, определяемыми выбранным состоянием происходит расчет конечных заданий, отрабатываемых активными шарнирами платформы. Под конечным заданием понимается такое состояние исполнительных систем робота, к которому итерационно стремится значение текущего задания, отрабатываемого регуляторами. При каждом обращении к функции текущее задание уменьшается или же увеличивается на фиксированную величину шага. Это необходимо для плавного изменения заданий, отрабатываемых регуляторами. На этапе, предваряющем формирование заданий для регуляторов, происходит корректировка скоростей вращения колёс по отношению к скоростям выдвижения/втягивания модулей. При выдвижении или же втягивании модулей расстояние между колесами уменьшается или же увеличивается. Если колеса при этом вращаются, это может привести к их пробуксовке как одному из следствий потери сцепления с опорной поверхностью. Поэтому значения желаемых скоростей вращения колес корректируются по отношению к скоростям выдвижения модулей. Корректировка происходит так, чтобы при выдвижении заднего модуля выполнялся режим качения задних колёс. Аналогично при втягивании модуля, скорость вращения колес увеличивается, что предотвращает «отставание» колес от модуля. В случае выдвижения/втягивания переднего модуля затормаживаются/ускоряются задние и средние колеса. В общем виде корректирующее выражение для расчета угловой скорости вращения колеса имеет вид:

$$\omega = \omega 0 \pm (v/r_w\ ), \qquad 1)$$

где ω– конечная угловая скорость колеса,

v– скорость выдвижения/втягивания переднего/заднего модулей,

r_w– радиус колеса платформы.

Последними этапами работы алгоритма является обновление текущих желаемых скоростей вращения колес, угла сгиба платформы и длин, на которые должны быть выдвинуты модули, расчёт ошибок фактического и желаемого состояния исполнительных систем и передача ошибок на ПИД-регуляторы. Блок-схема системы управления приведена на рисунке 5.

Разработанный подход к построению системы управления автономным движением в среде с препятствиями апробирован на виртуальной динамической модели роботизированной колёсной платформы. Кинограмма анимации результатов моделирования динамики платформы при преодолении эскарпа приведена на рисунке 6.

При подъезде к эскарпу платформа движется в первом состоянии (поз. 1). Затем платформа начинает подъем передних колёс на опорную поверхность уступа (поз. 2). По достижении рассчитанного из геометрических соображений угла поворота срединного шарнира начинается поворот в обратную сторону (поз. 3, поз. 4). Затем активируется четвертое состояние – задний модуль втягивается и поднима ется на опорную поверхность эскарпа (поз. 5, поз. 6).

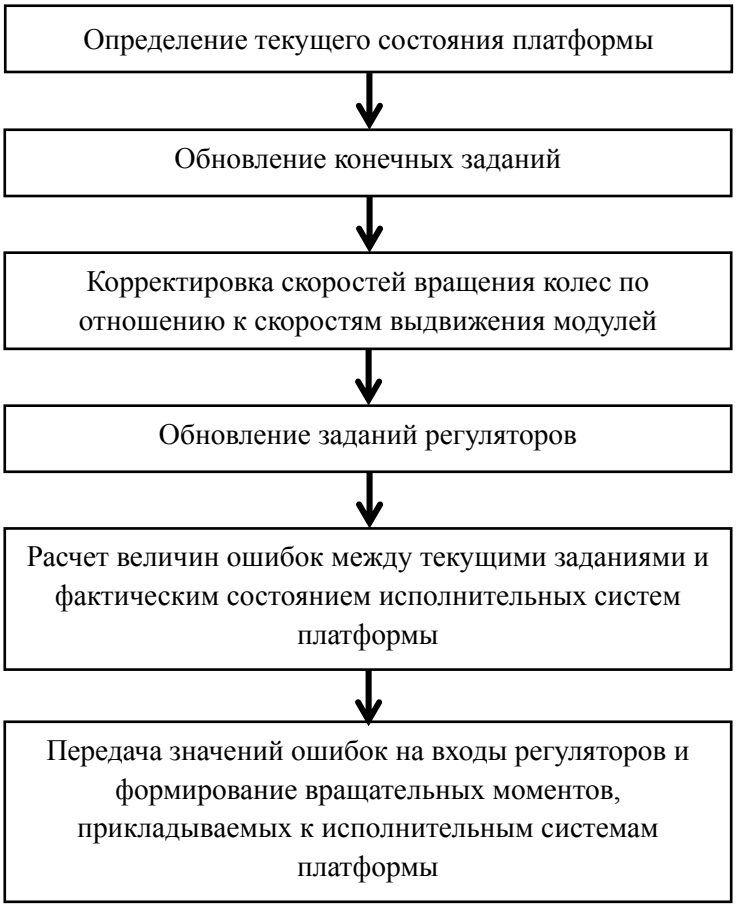


Рисунок 5 – Структура блока задания управляющих воздействий

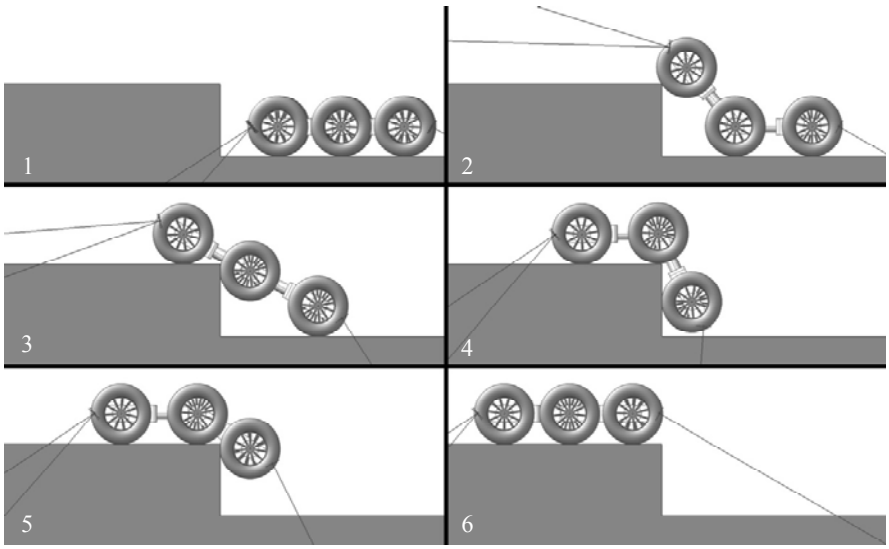


Рисунок 6 – кинограмма анимации результатов моделирования динамики платформы при преодолении эскарпа

Апробирование разработанного алгоритма на виртуальной динамической модели показало его эффективность при преодолении платформой уступов различной высоты, спуске с относительно высоких уступов и при пересечении рвов. Включение алгоритма в систему управления движением платформы обеспечивает преодоление препятствий с малым динамическим коэффициентом трения между опорными поверхностями и колесами устройства (от 0,3). Дальнейшая работа направлена на доработку алгоритма посредством введения в систему дополнительных дальномеров, расширение класса преодолеваемых платформой препятствий и исследование робастности алгоритма к изменению центра тяжести и массы полезной нагрузки.

S.H. Zabihifar, A.S. Yushchenko

ROBUST ADAPTIVE NEURAL NETWORK CONTROL OF ROTARY INVERTED PENDULUM

Bauman Moscow State Technical University
zabihifar@student.bmstu.ru

Abstract

Control the rotary inverted pendulum robot as a underactuated system is one of the examples that many methods have been proposed to solve it. The proposed method in this paper based on adaptive neural network algorithm. In this method, system can be controlled without requirement of knowing the parameters of the dynamic model. To estimate suitable coefficients of the neural network controller, adaptive laws implemented. although the Control variable doesn't have a direct relation with control input and also the dynamic equations are not determined for us, but the simulation results show the good performance of the controller. Using Lyapunov theory, the stability of the closed loop system can be proved. The simulation results with MATLAB are given to highlight the performances of the proposed control scheme.

Key words: Nonlinear control, Adaptive neural network, rotary inverted pendulum, Furuta

Introduction

Underactuated mechanical systems have more degrees of freedom than number of actuators. The motion control of such systems becomes difficult because the control of the overall system should be achieved from the actuated joints to the nonactuated joints. (Moreno-Valenzuela, 2016)

The rotary inverted pendulum (Figure 1) was first introduced by Furuta et al. (Furuta, 1991)Since it contains the wellknown underactuated dynamics, many reports can be found in the literature for its stabilization. Most of the controls for the rotary inverted pendulum fall into one of several categories. For example, some considered the problem of stabilizing the pendulum around the unstable vertical position. Some swung the pendulum from its hanging position to its upright vertical position. Some others tried to create oscillations around its unstable vertical position. (Huang, 2013) In this paper, we would like to consider the control problem of swing up the pendulum to its upright vertical position and stabilizing the pendulum around the unstable vertical position. Neural networks have been applied to achieve these control goals due to their approximation property and robustness. (Moreno-Valenzuela, 2016).

The Furuta pendulum is a two-degree-of-freedom system that has only one actuator. It is an inverted pendulum and is classified as a nonlinear, nonminimum phase, and underactuated system; its structure consists of an arm rotating in the horizontal plane that is attached to a motor. At the end of this arm, a pendulum that is allowed free rotational movement in the vertical plane is attached.

With respect to the stabilization problem, neural networks have been used in various pendulum-type systems (J. Nelson and L. G. Kraft, 1994)- (Liang, 2009), where the robustness property of neural networks was demonstrated using either real-time experiments or numerical simulations. In (Hsu, 2014), an adaptive neural network control for unknown nonlinear systems was proposed. The approach was applied to a car- pendulum, therein providing tracking of the pendulum without considering the cart's position. In (C.-F. Hsu, 2013), a dynamic Takagi–Sugeno–Kang-type, radial basis function-based neural-fuzzy system was proposed for online estimation of an ideal controller. Although the controller is able to solve a tracking problem, it was applied to the stabilization of the car-pole system; however, similarly to (Hsu, 2014), the boundedness of the cart position was not shown. In (Ping, 2013), a method based on neural networks with output feedback control was applied to address the tracking problem for a spherical inverted pendulum.

Several robust controllers were proposed for dealing with uncertainties and disturbances in the Furuta system. Yu et al. (Yu, 2010) proposed a robust controller to stabilize the Furuta pendulum under bounded perturbation. Khanesar et al. (Khanesar, 2007) used a fuzzy sliding controller to drive a rotary inverted pendulum to the vertical position subject to bounded uncertainties and disturbances. Park et al. (J. Nelson and L. G. Kraft, 1994) presented a swing-up and stabilization control with coupled sliding mode control. In (Pham Van Cuong, 2015), they propose an adaptive RBF network-based NN controller which combines with SMC robust compensator to control problems for two-link robot manipulator,in (Huang, 2013) an adaptive controller is proposed to balance a rotary inverted pendulum with time-varying uncertainties and finally in (Moreno-Valenzuela, 2016) The tracking control of pendulum-type systems using neural networks discussed.

In this paper, a new method for controlling a rotary inverted pendulum proposed that by using filtered tracking error and adaptive neural network algorithem, without knowing the dynamic model, it

can control the system well. Our goal is to drive the Furuta Pendulum system towards its desired equilibrium points from an initial condition and in that situation remain stable.

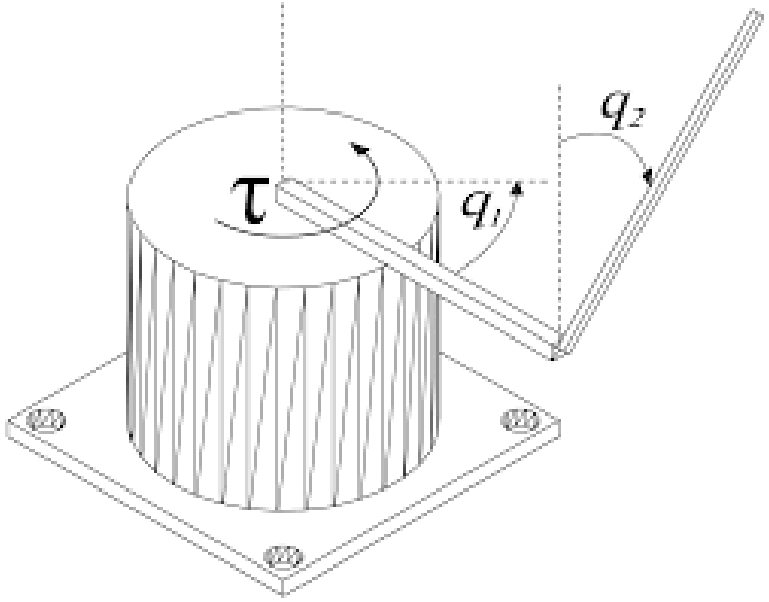


Figure 1–The Furuta pendulum system

System dynamics

The dynamic model of the Furuta pendulum in Euler–Lagrange form (Moreno-Valenzuela, 2016; Shubhobrata Rudra, 2013) can be written as

$$\mathrm{M}(\mathrm{q})\,\ddot{q} + \mathrm{C}(\mathrm{q},\dot{q})\,\dot{q} + g_m(\mathrm{q}) + \mathrm{f}(\dot{q}) = \mathrm{u}$$

where $q=[q_1\ q_2]^T \in IR^2$ is a vector of joint positions, $\mathrm{M(q)} \in IR^{2*2}$ is the symmetric positive definite inertia matrix, $c(q,\dot{q})\dot{q} \in IR^2$ is the vector of centripetal and Coriolis torques, $\mathrm{gm(q)} \in IR^2$ is the vector of gravitational torques, $f(\dot{q}) \in IR^2$ is the vector of friction torques, and $u=[\tau\ 0]^T \in IR^2$ is the vector of input torques, with $\tau \in$ IR being the torque applied to the arm. In particular, the model of the Furuta pendulum has the following components:

$$M(q)=\begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix}$$

$$C(q,\dot{q})=\begin{pmatrix} c_{11} \\ c_{21} \end{pmatrix}$$

$$g_m(q)=\begin{bmatrix} 0 \\ -m_2 g l_1 \sin(q_2) \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} m_{11} &= J_1 + m_2 l_1^2 + m_2 l_2^2 \sin^2(q_2) \\ m_{12} &= m_{21} = m_2 l_1 l_2 \cos(q_2) \\ m_{22} &= J_2 + m_2 l_2^2 \\ c_{11} &= 2m_2 l_2^2 \sin(q_2)\cos(q_2)\dot{q}_1\dot{q}_2 - m_2 l_1 l_2 \sin(q_2)\dot{q}_2^2 \\ c_{21} &= -m_2 l_2^2 \sin(q_2)\cos(q_2)\dot{q}_1^2 \end{aligned} \qquad (1)$$

$$f(\dot{q})=\begin{bmatrix} p_1\dot{q}_1 + p_2 \tanh(\alpha\dot{q}_1) \\ p_3\dot{q}_2 + p_4 \tanh(\alpha\dot{q}_2) \end{bmatrix},\ \alpha > 0$$

where the strictly positive systems parameters p_i, i = 1, . . ,4, are assumed to be unknown

Problem formulation

The rotary inverted pendulum has dynamics

$$\boldsymbol{M(q)\ddot{q} + V_m(q.\dot{q})\dot{q} + F(\dot{q}) + G(q) = u} \quad \textbf{(2)}$$

Define the tracking error e(t) and filtered error r(t) by

$$e = q_d - q$$
$$r = \dot{e} + \lambda e$$

With $\lambda > 0$ a positive definite design parameter matrix The robot dynamics are expressed in terms of the filtered error as

$$M\dot{r} = -V_m r + f(x) - u \quad (3)$$

Where the unknown nonlinear robot function is defined as

$$\text{f (x)} = \text{M (q)}\ (\ddot{q}_d + \lambda\dot{e}) + V_m(q.\dot{q})(\dot{q}_d + \lambda e) + F(\dot{q}) + G\ (q) \quad (4)$$

Now, according to the universal approximation property of NN, there is a Two-layer NN such that:

$$\text{f (x)} = W^T\sigma(V^T x) + \epsilon \quad (5)$$

With the approximation error bounded on a compact set by

$$\|\epsilon\| < \epsilon_N$$

Now, let a NN estimate of f(x) be given by

$$\hat{f}(x) = \hat{W}^T\sigma\left(\hat{V}^T x\right) \quad (6)$$

With $\hat{V}, \hat{W}$ the actual values of the NN weights given by the tuning algorithm to be specified. Note that $\hat{V}, \hat{W}$ are estimates of the ideal weight values and define the weight deviations or weight estimation errors as

$$\tilde{\text{V}} = \text{V} - \hat{\text{V}}\tilde{\text{W}} = \text{W} - \hat{\text{W}}$$

Controller structure and error system dynamics

In this section, the approximation of the corresponding command will be performed by SHL Networks (Figure 2). According to universal approximation theorem, the neural network of the type SHL can estimate any nonlinear, continuous, unknown function.(Hana Boudjedir, 2012)

So that ideal estimation of the equivalent controller by a SHL is giving by the following expression:

$$U = U_{eq} + U_r \quad (7)$$

$$\text{U}_{\text{eq}} = \text{W}^{\text{T}}\sigma\left(\text{V}^{\text{T}}\text{x}\right) + \varepsilon \quad (8)$$

$$\text{U}_{\text{r}} = \text{K}_{\text{v}}\text{r} \quad (9)$$

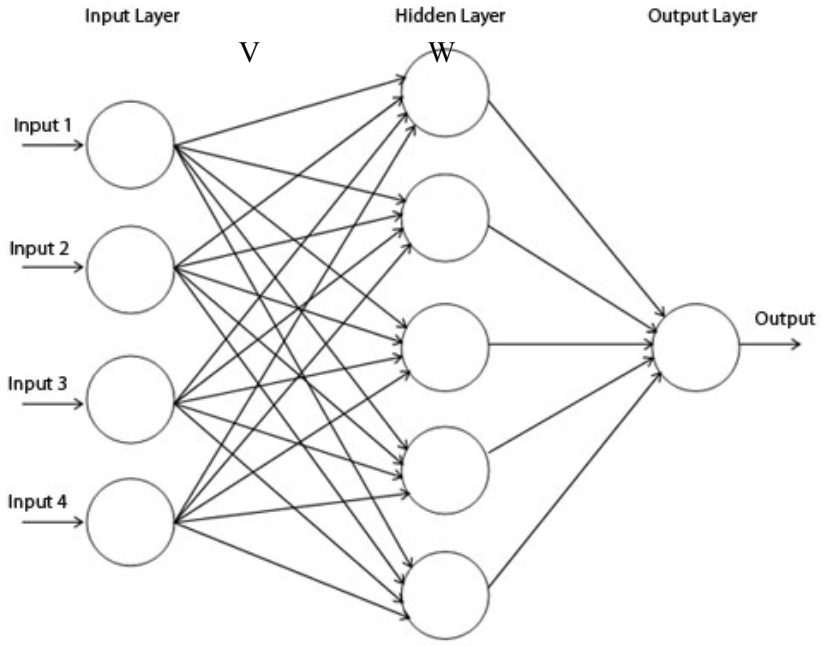


Figure 2 – SHL NN used in the control schemes

The optimal weights are unknown, it is necessary to estimate them by an adaptation mechanism so that the output feedback control law can be realized.

The matrixes $\hat{W}$ and $\hat{V}$ are the estimate of Wand Vrespectively. Thus, the adaptive control approximating the ideal SHLNN output is given by:

$$U_{eq} = \hat{W}^T \sigma(\hat{V}^T x) \tag{10}$$

Assumption: $\|W\|_F \leq W_m$. $\|V\|_F \leq V_m . with: W_m et V_m$ are unknown positive constants.

Then control input defined as

$$U = \hat{W}^T \sigma(\hat{V}^T x) + K_v r \tag{11}$$

Using this controller, the closed –loop filtered error dynamics become

$$M\dot{r} = -(K_v + V_m)r + W^T \sigma(V^T x) - \hat{W}^T \sigma(\hat{V}^T x) + \epsilon \tag{12}$$

Adding and subtracting $W^T \hat{\sigma} yields$

$$M\dot{r} = -(K_v + V_m)r + \tilde{W}^T \hat{\sigma} + W^T \tilde{\sigma} + \epsilon \tag{13}$$

Adding and subtracting now $\hat{W}^T \tilde{\sigma} yields$

$$M\dot{r} = -(K_v + V_m)r + \tilde{W}^T \hat{\sigma} + \hat{W}^T \tilde{\sigma} + \tilde{W}^T \tilde{\sigma} + \varepsilon \tag{14}$$

The key step is the use now of the taylor series approximation for $\tilde{\sigma}$, accrding to which the closed-loop error system is

$$M\dot{r} = -(K_v + V_m)r + \tilde{W}^T \hat{\sigma} + \hat{W}^T \hat{\sigma}' \tilde{V}^T x + w_1 \tag{15}$$

Where the disturbance terms are

$$w_1(t) = \tilde{W}^T \hat{\sigma}' \tilde{V}^T x + W^T O (\tilde{V}^T x)^2 + \varepsilon \tag{16}$$

Unfortunately, using this error system does not yield impact set outside which a certain Lyapunov function derivative is negative. Therefore, finally write the error system.

$$M\dot{r} = -(K_v + V_m)r + \widetilde{W}^T\left(\hat{\sigma} - \hat{\sigma}'\hat{V}^T x\right) + \widehat{W}^T\hat{\sigma}'\tilde{V}^T x + w \tag{17}$$

Where the disturbance terms are

$$w(t) = \tilde{w}^T\hat{\sigma}'V^T x + W^T O\ (\tilde{V}^T x)^2 + \varepsilon \tag{18}$$

we deduce that the convergence of *'r'* to zero implies convergence of the tracking error and its derivative to zero. So, the objective of control is summarized in the synthesis of a control law that allows the convergence to zero of the filtered error. (F W Lewis, 1998)

Let the desired trajectory $q_d(t)$ be bounded by q_b and the initial tracking error r(0). Suppose the disturbance term $w_1(t)$ in (15) is equal to zero. To achieve the goal of controlling the weights adaptation laws provided by:

$$\begin{aligned}\dot{\hat{W}} &= F\hat{\sigma}r^T \\ \dot{\hat{V}} &= Gx(\hat{\sigma}'^T\hat{W}r)^T\end{aligned} \tag{19}$$

With any constant positive definite design matrices F, G. Then the tracking error r(t) goes to zero with t and the weight estimates $\hat{V},\hat{W}\ arebounded$.

Proof

define the Lyapunov function candidate

$$L(r,\widetilde{W},\tilde{V}) = \tfrac{1}{2}r^T M(q)r + \tfrac{1}{2}tr\{\widetilde{W}^T F^{-1}\widetilde{W}\} + \tfrac{1}{2}tr\{\tilde{V}^T G^{-1}\tilde{V}\} \tag{20}$$

Differentiating yields

$$\dot{L} = r^T M\dot{r} + \tfrac{1}{2}r^T\dot{M}r + tr\left\{\widetilde{W}^T F^{-1}\dot{\widetilde{W}}\right\} + tr\left\{\tilde{V}^T G^{-1}\dot{\tilde{V}}\right\} \tag{21}$$

Whence substitution from (15) (with $w_1 = 0$) $yields$

$$\dot{\boldsymbol{L}} = -\boldsymbol{r^T K_v r} + \tfrac{1}{2}\boldsymbol{r^T}(\dot{\boldsymbol{M}} - \boldsymbol{2V_m})\boldsymbol{r} + \boldsymbol{tr}\left\{\widetilde{\boldsymbol{W}}^{\boldsymbol{T}}\left(\boldsymbol{F^{-1}}\dot{\widetilde{\boldsymbol{W}}} + \hat{\boldsymbol{\sigma}}\boldsymbol{r^T}\right)\right\} + \boldsymbol{tr}\left\{\widetilde{\boldsymbol{V}}^{\boldsymbol{T}}\left(\boldsymbol{G^{-1}}\dot{\widetilde{\boldsymbol{V}}} + \boldsymbol{x r^T}\widehat{\boldsymbol{W}}^{\boldsymbol{T}}\hat{\sigma}'\right)\right\} \tag{22}$$

The skew symmetry property makes the second term zero, and since $\widehat{W}$ = W – $\widetilde{W}$ With W constant so that

$\mathrm{d}\frac{\widehat{W}}{dt} = -d\widehat{W}/dt(andsimilarlyforV)thetuningrulesyield.$

$$\dot{L} = -r^T K_v r \tag{23}$$

So the Lyapunov first time derivative will be:

$$\dot{L} \leq 0$$

Which guarantee stability of closed-loop system(F W Lewis, 1998)

Implementation

The simulation of the Furuta Pendulum has been carried out on a Matlab® Simulink for 5 seconds with following initial condition: ($q_1 = 0, q_2 = pi/6$). The actual values of system parameters are $m_1 = 990gr, m_2 = 225gr, l_1 = 55cm, l_2 = 25cm$, $\lambda = 10$, number of hidden layers are 10 and initial values for W and V are zero.

To stabilize the system, the speed of the arm should also be controller and by applying the zero for it, we can have a stable system. Therefor the state variables considered are as follows.

$$X = \left[e_2.\dot{e_2}.e_{2_{delay}}.\dot{e_1}.\ddot{e_1}\right]$$

$$e_1 = q_{1_{desired}} - q1$$
$$e_2 = q_{2_{desired}} - q_2$$

The reason for introducing $e_{2_{delay}}$ is as follows. Since the neural network controller isitself a memory-less device, in order for control output to depend not only on the current input (error in our case), but also on past inputs, some delayed signals must be introduced. In this paper, we will consider only one simple delayed signal. However, in principle, multiple delayed signals can be introduced.

According to equation (19)Its parameters are calculated as follows.

$$\sigma(x) = \frac{1}{1+e^{-x}} \tag{24}$$

Then $\sigma'(x)$ is calculated as follows:(George Saikalis, 2001; Robert D Brandt, 1999; F W Lewis, 1998)

$$\sigma'(x) = \sigma(x)\sigma(-x) \tag{25}$$

The general form V, matrix coefficients for adaptive neural network will be as follows.

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{V}}_{11} & \dot{\hat{V}}_{12} & \cdots & \dot{\hat{V}}_{1j} \\ \dot{\hat{V}}_{21} & & & \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ \dot{\hat{V}}_{i1} & & \cdots & \dot{\hat{V}}_{ij} \end{bmatrix} = G \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\sigma}_1' \hat{W}_1 & \hat{\sigma}_2' \hat{W}_2 & \cdots & \hat{\sigma}_j' \hat{W}_j \end{bmatrix} r$$

Simulation results

The simulation results presented in this section are to be able to see the operation of adaptive neuro controller and input control signals. The aim is a vertical position of pendulum at an angle of zero and keeping the stability at this situation.

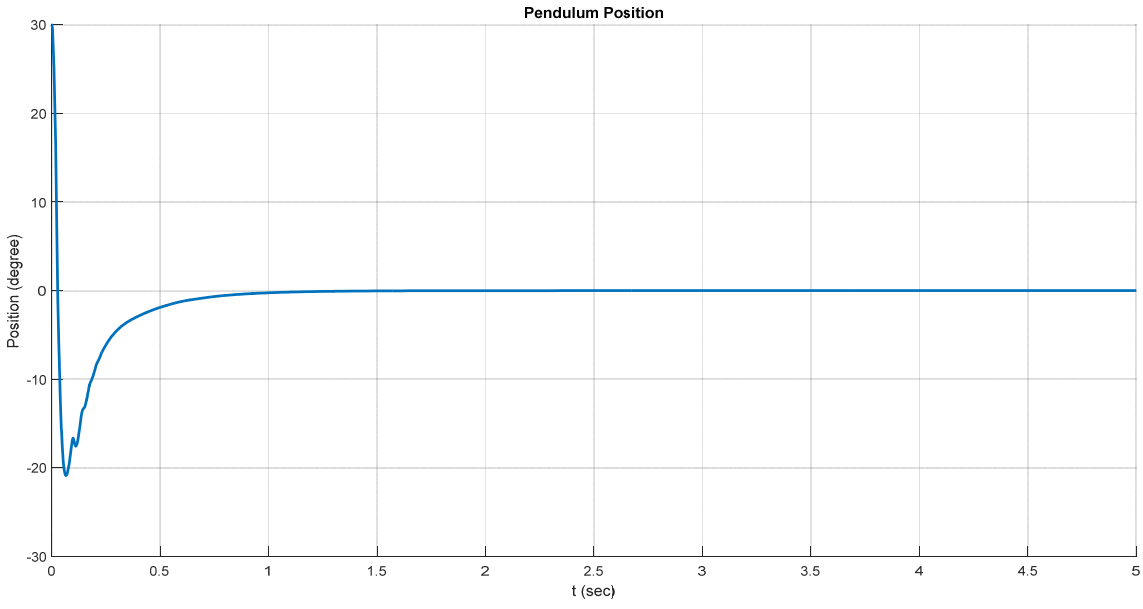


Figure 3 – angle of Pendulum position

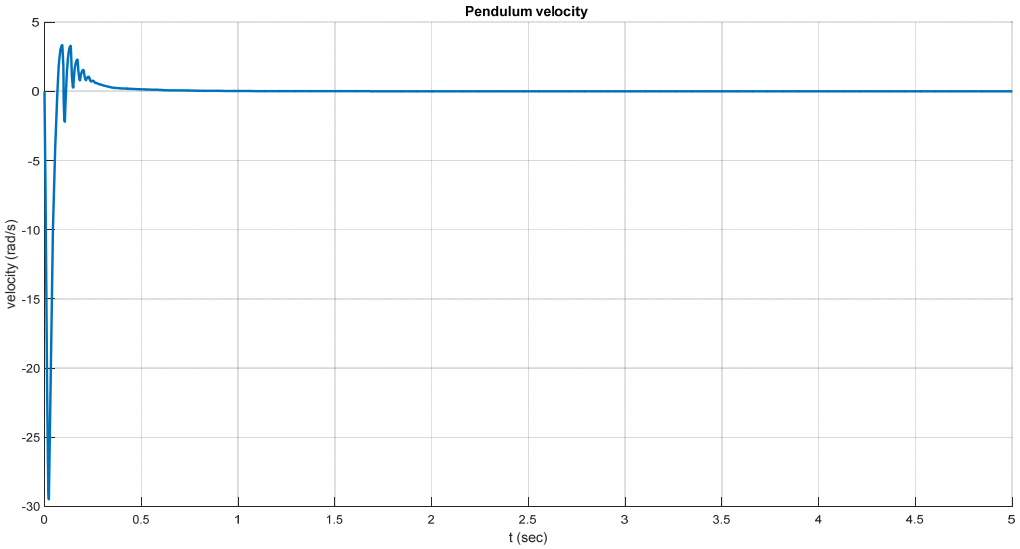


Figure 4 – The angular velocity of Pendulum

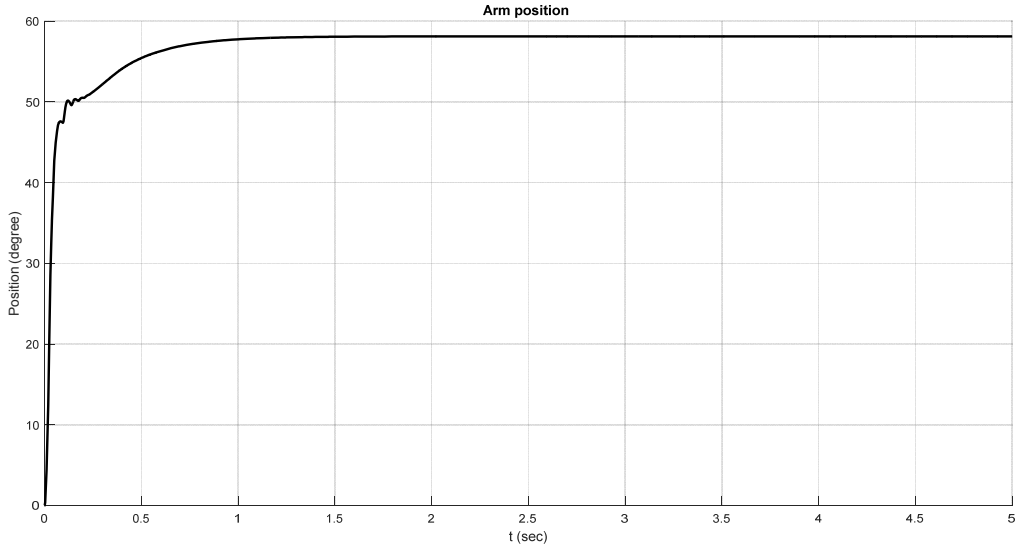


Figure 5 - The angle of Armposition

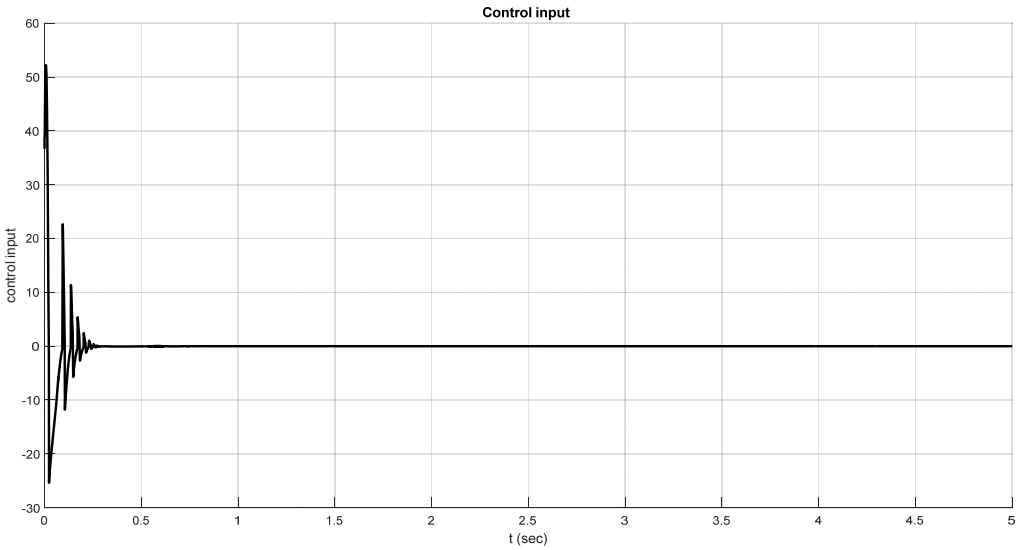


Figure 6 –Control input

As can be seen, in a very short time, controller can adapt the parameters with a completely unknown model and control the system well. Also the control input is within the acceptable range.

To check the robustness of the controller, an external disturbance as a torque be applied for 0.2 seconds and the controller behavior will be evaluated. A disturbance signal applied on the system as shown in Figure 7. The other variables with time has been shown in Figure 8 - Figure 10.

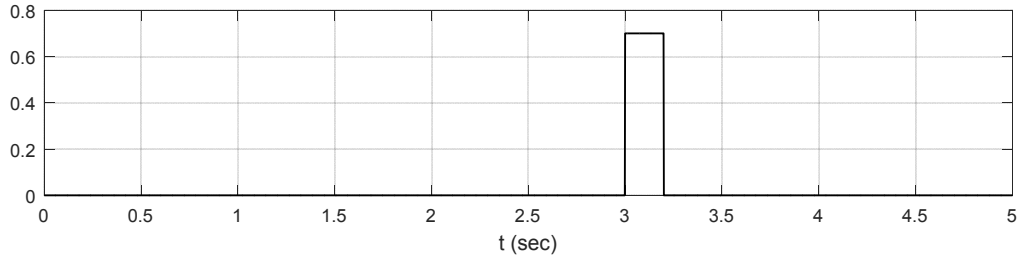


Figure 7 – Disturbance signal

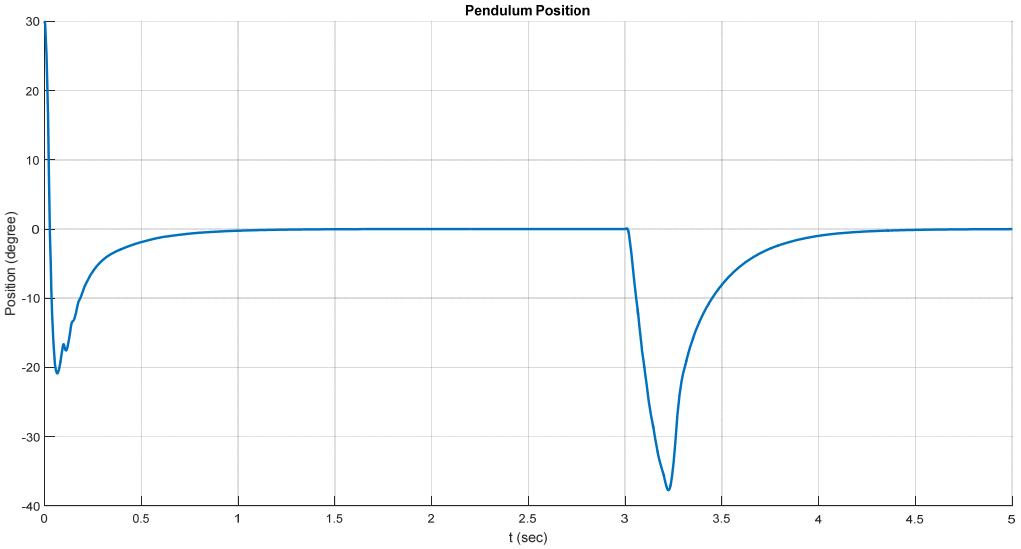


Figure 8 – angle of Pendulum position with disturbance

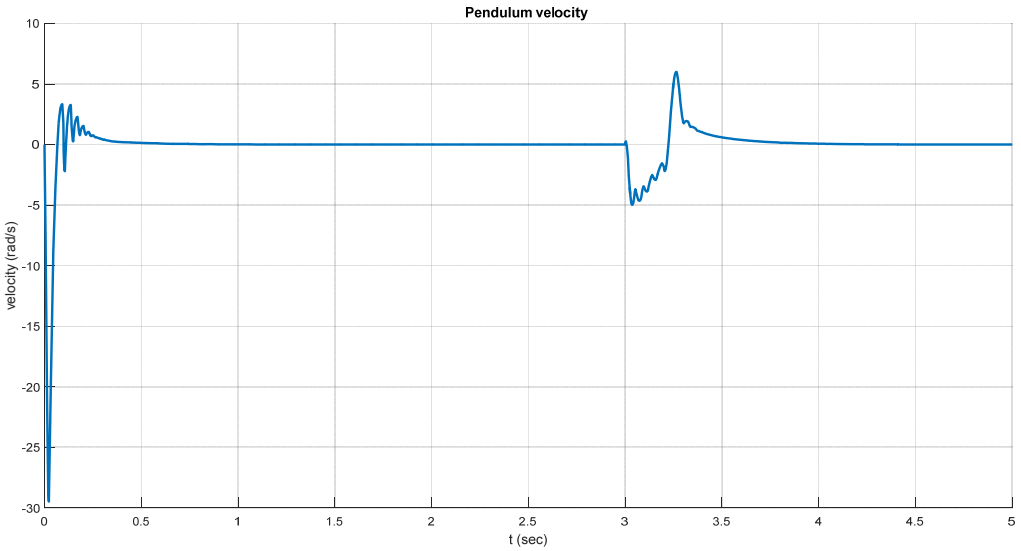


Figure 9 - The angular velocity of Pendulum with disturbance

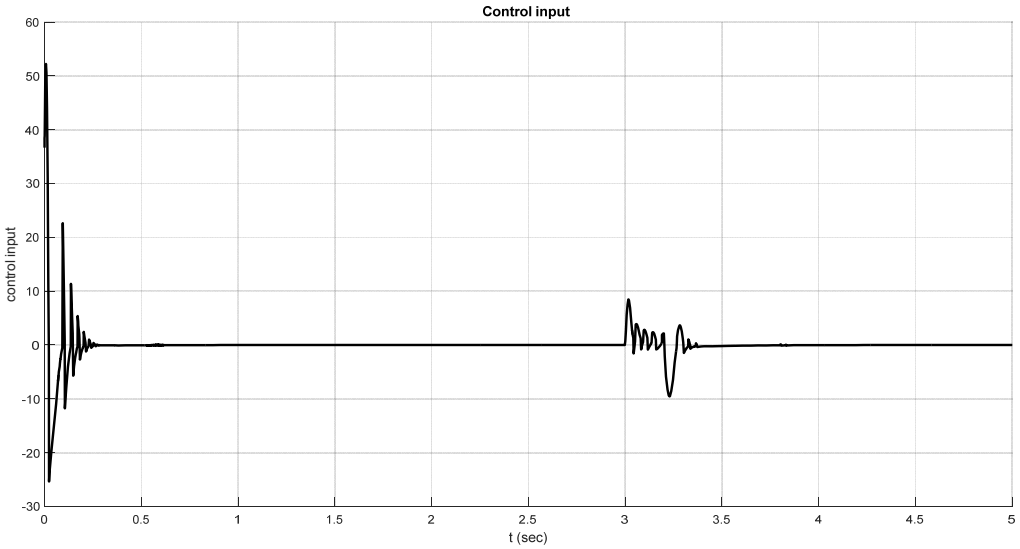


Figure 10 - Control input with disturbance

As you can see in the figures, disturbance applied within 0.2 seconds, changed pendulum angle significantly from the steady-state and controller returns the system to the steady state quickly. Small amounts of control inputs and lack of the sharp fluctuations in answers show a good performance of the controller in an underactuated system.

Controller is able to effIciently drive the Furuta Pendulum system towards its desired equilibrium points (i.e. X=O). Simulation results clearly reveal the stabilizing ability of the controller. Hence, the algorithm can be employed to any other two degree of freedom systemwith a slight design modifIcation.

Conclusion

In this paper, we have successfully demonstrated the development and application of an adaptive neural network control system to swing up the pendulum to its upright vertical position and stabilizing the pendulum around the unstable vertical position. The controller was derived from the universal approximation property of neural networks, and weight adaptation laws were designed. The simulation results clearly exhibit the efficiency of the proposed control law for an uncertain nonlinear underactuated system. The proposed controller simultaneously stabilizes the orientation angle as well as the pendulum angular position. Furthermore, the proposed algorithm is generalized and its easily extendable for any other two degrees of freedom underactuated system.

1. J. Moreno-Valenzuela, "Adaptive Neural Network Control for the Trajectory Tracking of the Furuta Pendulum," IEEE TRANSACTIONS ON CYBERNETICS, 2016.
2. K. Y. M. K. S. Furuta, "Swing-up control of inverted pendulum," in International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation, 1991.
3. Y.-F. C. ·. A.-C. Huang, "Adaptive control of rotary inverted pendulum system with time-varying uncertainties," Springer, pp. 1112-4, 2013.
4. J. Nelson and L. G. Kraft, "29 Real-time control of an inverted pendulum system using complementary neural network and optimal techniques," in American Control Conference, Baltimore, 1994.
5. S. C. a. Y. Liang, "31 PID-like neural network nonlinear adaptive control for uncertain multivariable motion control systems," IEEE Trans.Ind. Electron., p. 3872–3879, 2009.
6. C.-F. Hsu, "37 Adaptive backstepping Elman-based neural control for unknown nonlinear systems," Neurocomputing, vol. 136, p. 170–179, 2014.
7. C.-M. L. a. R.-G. Y. C.-F. Hsu, "38 Supervisory adaptive dynamic RBF-based neural-fuzzy control system design for unknown nonlinear systems," Appl. Soft Comput.,, vol. 13, p. 1620–1626, 2013.
8. Z. Ping, "39 Tracking problems of a spherical inverted pendulum via neural network enhanced design," Neurocomputing, vol. 106, p. 137–147, 2013.
9. C. W. F. L. Y. Yu, "34 Robust control of a Furuta pendulum," in SICE Annual Conference, 2010.
10. M. T. M. S. M. Khanesar, "22 Fuzzy sliding mode control of rotary inverted pendulum," in IEEE

International Conference on Computational Cybernetics, 2007.
11. W. Y. N. Pham Van Cuong, "Adaptive trajectory tracking neural network control with robust compensator for robot manipulators," The Natural Computing Applications, vol. 27, p. 525–536, 2015.
12. R. k. B. Shubhobrata Rudra, "Stabilization of Furuta Pendulum: A Backstepping Based Hierarchical Sliding Mode Approach with Disturbance Estimation," in 7'th International Conference on Intelligent Systems and Control (ISCO), 2013.
13. F. Y. O. B. a. R. Hana Boudjedir, "DUAL NEURAL NETWORK FOR ADAPTIVE SLIDING MODE CONTROL OF QUADROTOR HELICOPTER STABILIZATION," International Journal of Information Sciences and Techniques (IJIST), vol. 2, 2012.
14. S. J. A. Y. F W Lewis, Neural Network Control Of Robot Manipulators And Non-Linear Systems, Taylor & Francis, 1998.
15. F. L. George Saikalis, "ADAPTIVE NEURAL NETWORK CONTROL BY ADAPTIVE INTERACTION," in Proceedings of the American Control Conference, 2001.
16. F. L. Robert D Brandt, "Adaptive Interaction and its Application to Neural Networks," Information Sciences , vol. 121.3, pp. 201-215, 1999.
17. P. K. a. R. L. K. E. S. Sazonov, "30 Hybrid LQG-neural controller for inverted pendulum system," in 35th Southeastern Symp. Syst. Theory (SSST), Morgantown, 2003.
18. M. C. D. Park, "29 Swing-up and stabilization control of inverted-pendulum systems via coupled sliding-mode control method," IEEE Trans. Ind. Electron, vol. 56(9), p. 3541–3555, 2009.

С.Х. Забихифар, А.С. Ющенко

РОБАСТНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ВРАЩЕНИЕМ ПЕРЕВЕРНУТОГО МАЯТНИКАС ПОМОЩЬЮ АДАПТИВНОЙ НЕЙРОНОЙ СЕТИ

МГТУ им. Н.Э.Баумана, Москва
zabihifar@student.bmstu.ru

Аннотация

Стабилизация вращения перевернутого маятника в качестве неустойчивой системы является одним из тех вопросов, для решение которых было предложено множество методов. Метод рассматриваемый в данной работе основан на адаптивном алгоритме нейронной сети. Данный метод позволяет контролировать систему без необходимости учета параметров динамической модели. Для выявления подходящих коэффициентов нейросетевого регулятора, применяются адаптивные законы. Несмотря на то что, контроль переменных напрямую не связан с контролем входа, а динамические уравнения вычислены, моделирование показывает хорошие результаты работы стабилизатора. С помощью теории Ляпунова, может быть доказана устойчивость замкнутой системы. Для того чтобы подчеркнуть производительность предложенной системы контроля приведены результаты моделирования с использованием MATLAB.

Ключевые слова: нелинейное управление, адаптивная нейронная сеть, роторный перевернутый маятник, Фурута.

Введение

Механическая система с избыточностью имеет больше степеней подвижности, чем число движителей. Поэтому задача управления движением усложняется тем, что управление системой в целом должно осуществляться за счет только активных степеней подвижности с учетом и движения в пассивных степенях [1].

Вращающийся перевернутый маятник - манипулятор (Рис.1) впервые был рассмотрен в работе Furutaetal. [2]. Он обладает избыточностью, поскольку активной является только степень вращения основания относительно вертикальной оси, а две другие степени подвижности пассивны. В ряде работ предлагались способы стабилизации этого устройства. В некоторых из них рассматривалась задача стабилизации конструкции относительно неустойчивого вертикального положения. В других ставилась задача вывода устройства из начального в вертикальное положение, или обеспечить колебания относительно этого положения [3]. В нашей работе рассматривается задача вывода манипулятора в

вертикальное положение и его стабилизация в этом положении. Для этого применяется адаптивная нейросеть, обеспечивающая робастность управления.

Маятник Фурута, таким образом представляет собой систему с двумя степенями подвижности и с одним двигателем. Это перевернутый маятник, представляющий собой нелинейную, неминимально-фазовую систему с избыточностью; он состоит из двухстепенного манипулятора, который вращается в горизонтальной плоскости за счет двигателя. При этом манипулятор может совершать свободное перемещений в вертикальной плоскости.

Для решения задачи стабилизации нейросети уже применялись для различных типов маятника [4]- [5]. Робастность таких систем была показана как реальными экспериментами, так и численным моделированием. В работе [6] адаптивная нейросеть применялась для управления нелинейной системой с неизвестной динамикой. Рассматривалась задача стабилизации перевернутого маятника на подвижном основании. В [7] применялась нейро-нечеткая сеть типа Takagi–Sugeno–Kang для настройки контроллера в процессе работы (online). Контроллер успешно решал задачу стабилизации, близкую по своей постановке к рассмотренной в [6], однако область допустимых перемещений основания не была установлена. В [8] метод, также основанный на применении нейросетей с использованием обратных связей, был применен для проблемы отслеживания положения сферического перевернутого маятника.

Был предложен ряд робастных контроллеров, обеспечивающих управление системой Furuta в условиях неопределенности и внешних возмущений. Так, в работе Yuetal. [9] был предложен робастный контроллер, обеспечивающий стабилизацию маятника Furuta при действии ограниченных возмущений. В работе Khanesaretal. [10] использовался нечеткий контроллер, обеспечивающий работу в скользящем режиме и удерживающий маятник в вертикальном положении при ограниченных неопределенностях и возмущениях. В работеParketal.[4] рассматривалась задача вывода маятника в заданное положение и его стабилизация также с помощью скользящих режимов. В [11] эти же авторы предложили адаптивную сеть типа RBF, в сочетании с SMC компенсатором для решения проблемы управления двухстепенным манипулятором. В [3] применялся адаптивный контроллер для стабилизации перевернутого маятника при наличии неопределенностей, меняющихся во времени, наконец, в [1] обсуждалась проблема слежения за положением маятника с помощью нейросети.

В данной работе предлагаеbтся новый метод для управления перевернутым маятником с использованием отфильтрованного сигнала ошибки и с применением адаптивной нейроети. При этом не предполагается знания динамической модели механизма. Задача состояла в выведении маятника Furuta в заданное положение из любого начального положения и его стабилизация в желаемом положении.

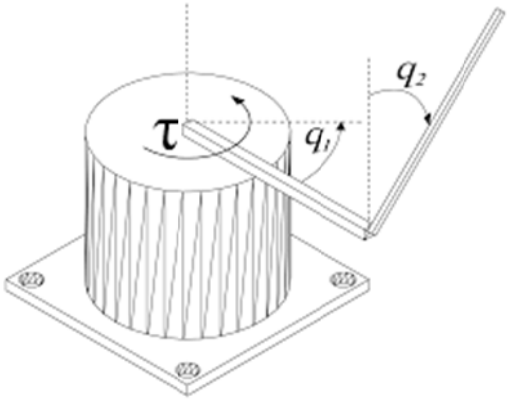


Рисунок 1 – Маятниковая система Фурута

Системная динамика

Динамическая модель маятника Фурута в форме Эйлера-Лагранжа [1,12] записывается как

$$M(q)\,\ddot{q} + C(q,\dot{q})\,\dot{q} + g_m(q) + f(\dot{q}) = u$$

где $q = [q_1\ q_2]^T \in IR^2$ это вектор объединённых позиций, $M(q) \in IR^{2*2}$ симметричная положительно определенная инерционная матрица, $c(q,\dot{q})\dot{q} \in IR^2$ это вектор центростремительных крутящих моментов и крутящих моментов Кориолиса, $gm(q) \in IR^2$ это вектор гравитационных крутящих моментов, $f(\dot{q}) \in IR^2$ это вектор фрикционных крутящих моментов, $u = [\tau\ 0]^T \in IR^2$ это

вектор внутренних крутящих моментов. В частности, модель маятника Фурута имеет следующие компоненты:

$$M(q) = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix}$$

$$C(q,\dot{q}) = \begin{pmatrix} c_{11} \\ c_{21} \end{pmatrix}$$

$$g_m(q) = \begin{bmatrix} 0 \\ -m_2 g l_1 \sin(q \end{bmatrix}$$

$$m_{11} = J_1 + m_2 l_1^2 + m_2 l_2^2 \quad (2)$$

$$m_{12} = m_{21} = m_2 l_1 l_2 \cos($$

$$m_{22} = J_2 + m_2 l_2^2$$

$$c_{11} = 2 m_2 l_2^2 \sin(q_2)\cos$$

$$c_{21} = -m_2 l_2^2 \sin(q_2)\cos$$

$$f(\dot{q}) = \begin{bmatrix} p_1 \dot{q}_1 + p_2 \tanh \\ p_3 \dot{q}_2 + p_4 \tanh \end{bmatrix}$$

где строго положительные параметры системы p_i, i = 1, . . ,4, принимаются за неизвестных.

Формулировка задачи

Обратно вращающийся маятник имеет динамику

$$\boldsymbol{M(q)\ddot{q} + V_m(q.\dot{q})\dot{q} + F(\dot{q}) + G(q) = u} \quad (2)$$

Определяя сопроводительную ошибку как e(t) и фильтрованную ошибку как r(t), получаем

$$e = q_d - q$$
$$r = \dot{e} + \lambda e$$

где $\lambda > 0$ и является положительным параметром матрицы. Роботизированная динамика выражается в виде

$$M\dot{r} = -V_m r + f(x) - u \quad (3)$$

Где неизвестная нелинейная функция определяется как

$$f(x) = M(q)(\ddot{q}_d + \lambda \dot{e}) + V_m(q.\dot{q})(\dot{q}_d + \lambda e) + F(\dot{q}) + G(q) \quad (4)$$

Теперь, руководствуясь аппроксимационным свойством NN, существует 2 слоя NN, такие как:

$$f(x) = W^T \sigma(V^T x) + \epsilon \quad (5)$$

Ограничив аппроксимационную ошибку

$\|\epsilon\| < \epsilon_N$

Пусть параметр NN функции

$$\hat{f}(x) = \hat{W}^T \sigma(\hat{V}^T x) \quad (6)$$

Взяв за $\hat{V}, \hat{W}$ реальный вес NN, можно вычислить погрешности и ошибки

$$\tilde{V} = V - \hat{V} \quad \tilde{W} = W - \hat{W}$$

Структура контроллера и динамика ошибочной системы

В этой секции аппроксимация соответствующих команд будет осуществлена за счет сетей SHL (рисунок 2). Руководствуясь универсальной аппроксимационной теоремой, нейронные сети типа SHL могут оценивать нелинейные, продолжительные, неизвестные функции. [13] Таким образом, идеальная оценка эквивалентного контроллера SHL может быть записана так

$$U = U_{eq} + U_r \tag{7}$$

$$\mathrm{U_{eq}} = \mathrm{W^T}\sigma(\mathrm{V^T x}) + \varepsilon \tag{8}$$

$$\mathrm{U_r} = \mathrm{K_v r} \tag{9}$$

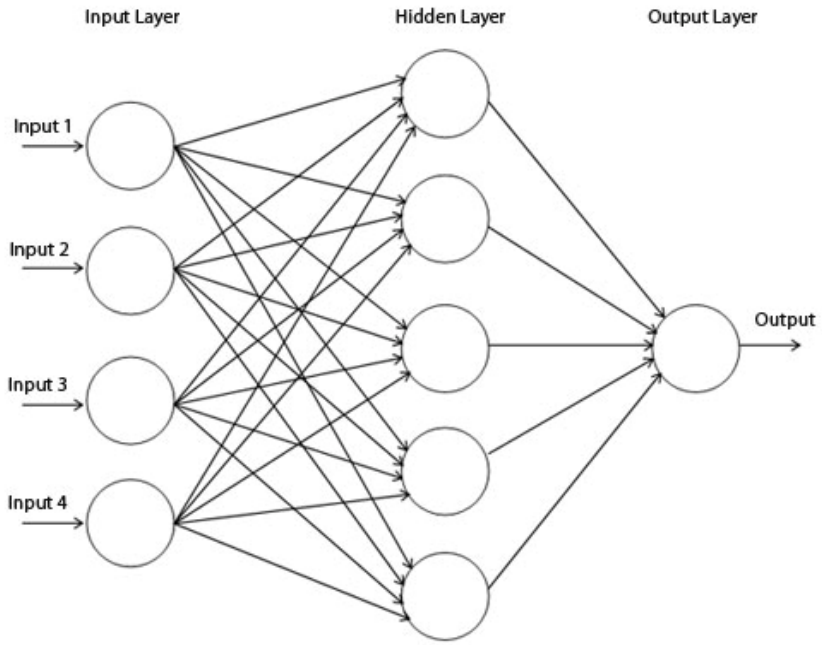


Рисунок 2– SHLNN, использованное в контрольных схемах

Когда оптимальный вес неизвестен, необходимо вычислить его путем адаптационного механизма, для того, чтобы закон обратного управления мог быть реализован.

Матрицы $\hat{W}$ и $\hat{V}$ являются расчетами Wи V соответственно. Тем временем, адаптивное управление, исчисляющее идельный SHLNN исчисляется как

$$U_{eq} = \hat{W}^T \sigma(\hat{V}^T x) \tag{10}$$

Вывод: $\|W\|_F \leq W_m.\ \|V\|_F \leq V_m.with: W_m et\ V_m$ неизвестные положительные константы.
Вход управления равен

$$U = \hat{W}^T \sigma(\hat{V}^T x) + K_v r \tag{11}$$

Используя данный контроллер, замкнутая ошибка динамики превращается в

$$\mathrm{M}\dot{r} = -(K_v + V_m)r + W^T\sigma(V^T x) - \widehat{W}^T\sigma(\hat{V}^T x) + \epsilon \tag{12}$$

Прибавление и вычитание $W^T\sigma$ приводит к

$$M\dot{r} = -(K_v + V_m)r + \widetilde{W}^T\hat{\sigma} + W^T\tilde{\sigma} + \epsilon \quad (13)$$

Прибавление и вычитание $\widehat{W}^T\sigma$ приводит к

$$M\dot{r} = -(K_v + V_m)r + \widetilde{W}^T\hat{\sigma} + \widehat{W}^T\tilde{\sigma} + \widetilde{W}^T\tilde{\sigma} + \varepsilon \quad (14)$$

Ключевым моментом является использование аппроксимации $\tilde{\sigma}$, соответственно которой замкнутая система равняется

$$M\dot{r} = -(K_v + V_m)r + \widetilde{W}^T\hat{\sigma} + \widehat{W}^T\hat{\sigma}'\tilde{V}^T x + w_1 \quad (15)$$

Где искажение

$$w_1(t) = \widetilde{W}^T\hat{\sigma}'\tilde{V}^T x + W^T O\,(\tilde{V}^T x)^2 + \varepsilon \quad (16)$$

К сожалению, использование этой системы ошибок не говорит нам о том, что производная функции Ляпунова является отрицательной. Однако, запишем конечную формулировку

$$M\dot{r} = -(K_v + V_m)r + \widetilde{W}^T\left(\hat{\sigma} - \hat{\sigma}'\hat{V}^T x\right) + \widehat{W}^T\hat{\sigma}'\tilde{V}^T x + w \quad (17)$$

Где искажение

$$w(t) = \widetilde{w}^T\hat{\sigma}'V^T x + W^T O\,(\tilde{V}^T x)^2 + \varepsilon \quad (18)$$

мы догадываемся, что сходимость r к нулю подразумевает сходимость сопроводительной ошибки и ее производной к нулю. [14]

Допустим, что желаемая траектория $q_d(t)$ ограничена q_b и первоначальная сопроводительная ошибка r(0). Предположим, что искажение в работе [15] равно нулю. Чтобы достичь цели управления весом:

$$\dot{\hat{W}} = F\hat{\sigma}r^T$$
$$\dot{\hat{V}} = Gx(\hat{\sigma}'^T\hat{W}r)^T \quad (19)$$

Доказательство

Определив функцию Ляпунова

$$L(r,\widetilde{W},\tilde{V}) = \frac{1}{2}r^T M(q)r + \frac{1}{2}tr\{\widetilde{W}^T F^{-1}\widetilde{W}\} + \frac{1}{2}tr\{\tilde{V}^T G^{-1}\tilde{V}\} \quad (20)$$

Продифференцировав

$$\dot{L} = r^T M\dot{r} + \frac{1}{2}r^T\dot{M}r + tr\left\{\widetilde{W}^T F^{-1}\dot{\widetilde{W}}\right\} + tr\left\{\tilde{V}^T G^{-1}\dot{\tilde{V}}\right\} \quad (21)$$

Заменив (15) на $w_1 = 0$ получаем

$$\dot{\boldsymbol{L}} = -\boldsymbol{r^T K_v r} + \frac{\boldsymbol{1}}{\boldsymbol{2}}\boldsymbol{r^T}(\dot{\boldsymbol{M}} - \boldsymbol{2V_m})\boldsymbol{r} + \boldsymbol{tr}\left\{\widetilde{\boldsymbol{W}}^{\boldsymbol{T}}(\boldsymbol{F^{-1}}\dot{\widetilde{\boldsymbol{W}}} + \hat{\boldsymbol{\sigma}}\boldsymbol{r^T})\right\} + \boldsymbol{tr}\left\{\tilde{\boldsymbol{V}}^{\boldsymbol{T}}(\boldsymbol{G^{-1}}\dot{\tilde{\boldsymbol{V}}} + \boldsymbol{x r^T}\widehat{\boldsymbol{W}}^{\boldsymbol{T}}\hat{\sigma}')\right\} \quad (22)$$

Свойство симметрии обращает второй знаменатель в ноль, и пока W^ = W – W~. W является константой и, соответственно, dW~/dt=-dW^/dt, поэтому

L~ = -r^TK_vr (23)

Поэтому первая производная Ляпунова будет

$$\dot{L} \leq 0$$

Что гарантирует стабильность замкнутой системы. [14]

Практическая значимость

Моделирование маятника ФУРУТА проводилась в Matlab® Simulink на протяжении 5 секунд со следующими первоначальными условиями: ($q_1 = 0,\ q_2 = pi/6$). Настоящие значения параметров системы $m_1 = 990\,gr, m_2 = 225\,gr,\ l_1 = 55\,cm, l_2 = 25\,cm$, $\lambda = 10$, число скрытых слоев 10 и начальные значения для W и V равняются нулю.

Чтобы стабилизировать систему , скорость тоже должна быть равна нулю. Однако статичные переменные должны быть приняты за:

$$X = \left[e_2 . \dot{e_2} . e_{2_{delay}} . \dot{e_1} . \ddot{e_1}\right]$$
$$e_1 = q_{1_{desired}} - q1$$
$$e_2 = q_{2_{desired}} - q_2$$

Причина введения $e_{2_{delay}}$вследующем. Так как контроллер нейронных сетей само по себе устройство без памяти для того, чтобы выход зависел не только от текущего входа, но и от предыдущих входов, должны быть введены некоторые отложенные сигналы. Однако, в принципе, могут быть введены и кратные отложенные сигналы.

Руководствуясь равенством [19], его параметры исчисляются следующим образом.

$$\sigma(x) = \frac{1}{1+e^{-x}} \tag{24}$$

Затем $\sigma'(x)$ вычисляется как :[15, 16, 14]

$$\sigma'(x) = \sigma(x)\sigma(-x) \tag{25}$$

Общая форма V, коэффициенты матрицы для адаптивной нейронной сети вычисляется следующим образом.

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{V}}_{11} & \dot{\hat{V}}_{12} & \cdots & \dot{\hat{V}}_{1j} \\ \dot{\hat{V}}_{21} & & & \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ \dot{\hat{V}}_{i1} & & \cdots & \dot{\hat{V}}_{ij} \end{bmatrix} = G \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\sigma}_1' \hat{W}_1 & \hat{\sigma}_2' \hat{W}_2 & \cdots & \hat{\sigma}_j' \hat{W}_j \end{bmatrix} r$$

Результаты моделирования

Результаты моделирования, представленные в этой секции должны показать операции адаптивного нейро контроллера и входных сигналов. Целью является вертикальное положение маятника под углом ноль градусов и сохранение стабильности в этих условиях.

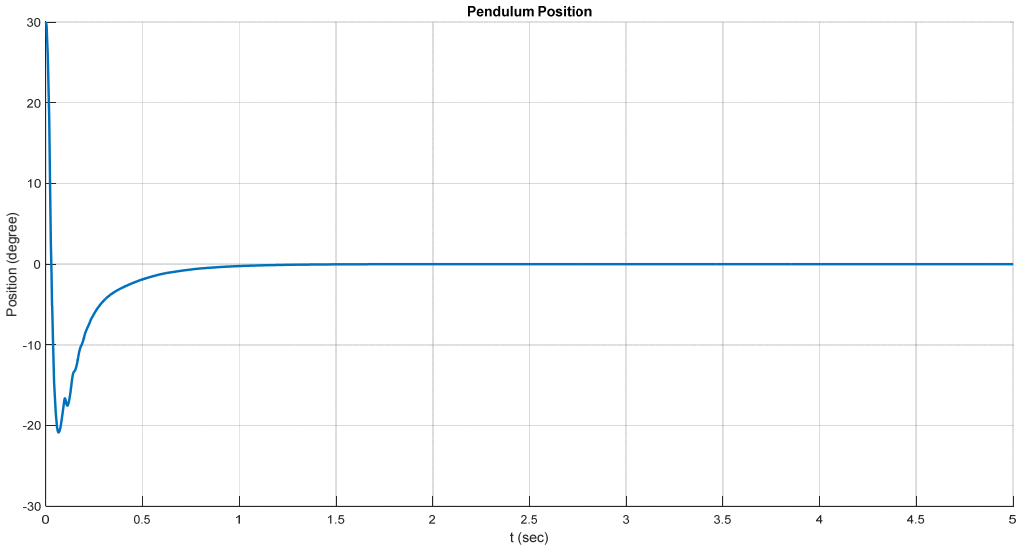


Рисунок 3 – Угол положения маятника

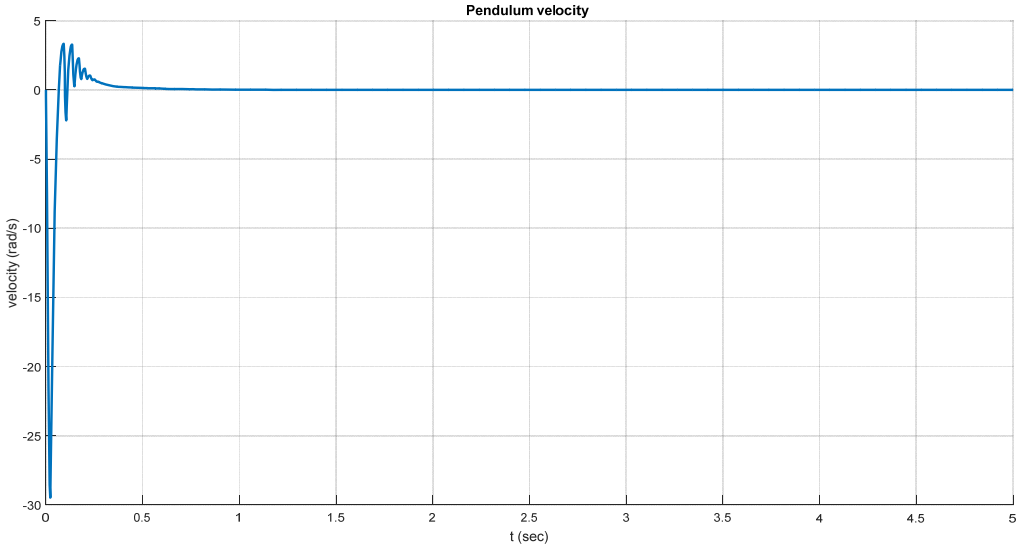


Рисунок 4 – Угловая частота маятника

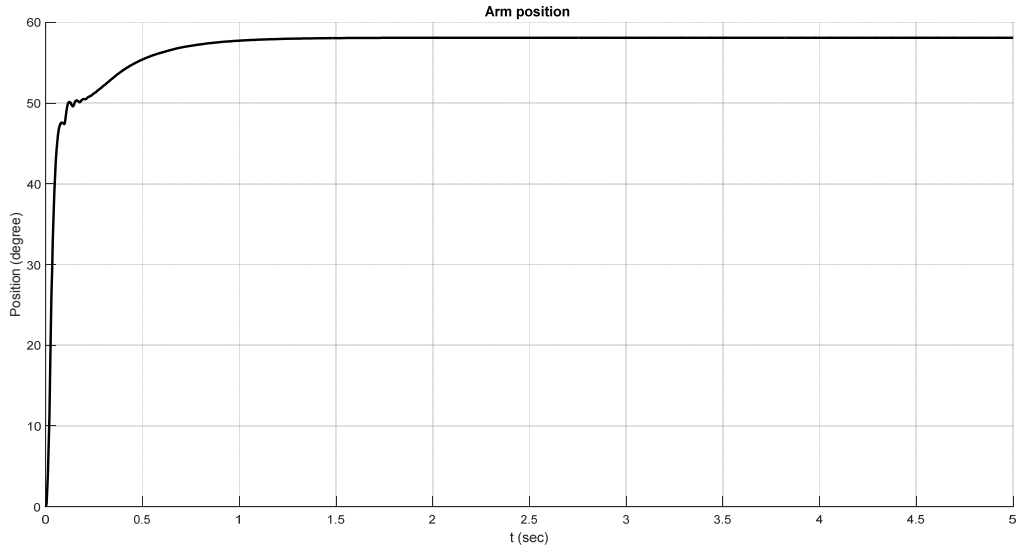


Рисунок 5 – Угол положения руки

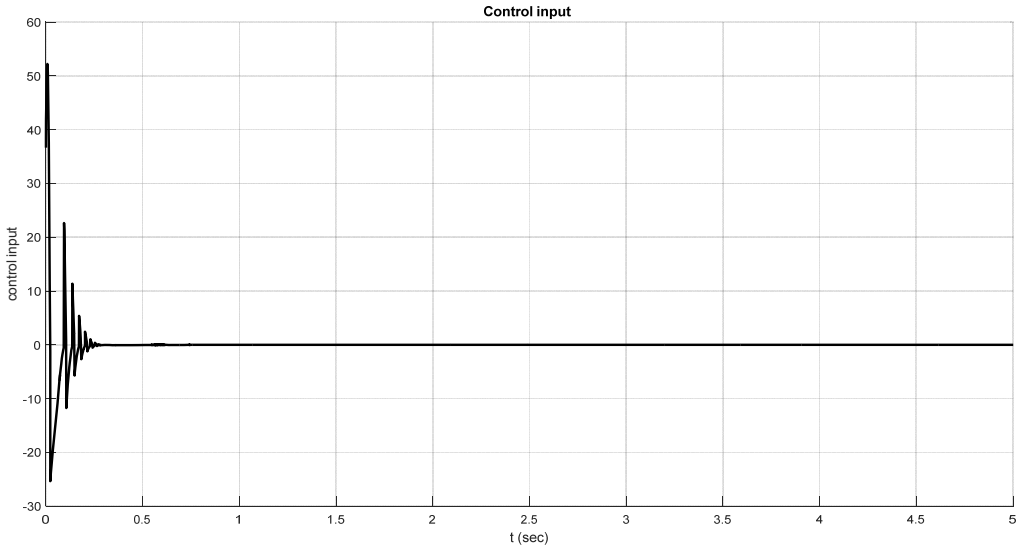


Рисунок 6 – Вход управления

Как можно увидеть, за очень маленький промежуток времени, контроллер может адаптировать параметры совершенно незнакомой модели и отлично управлять системой. А так же вход находится в пределах допустимого диапазона.

Для того, чтобы проверить устойчивость контроллера, нужно принять внутреннюю погрешность как крутящий момент за 0,2 секунды и таким образом будет вычислено поведение контроллера. Сигнал погрешности, принятый в системе, показан на рис 7. Другие переменные времени были показаны на рисунках 8-10.

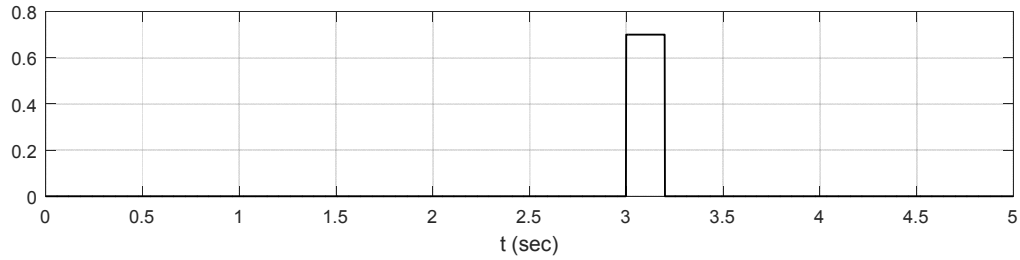


Рисунок 7 – Сигнал погрешности

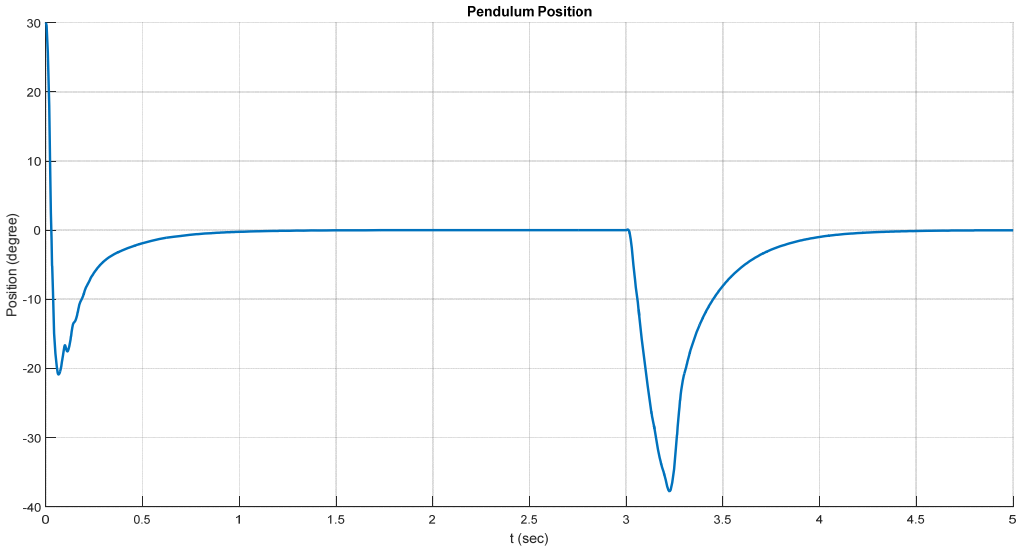


Рисунок 8 – Угол положения маятника с погрешностью

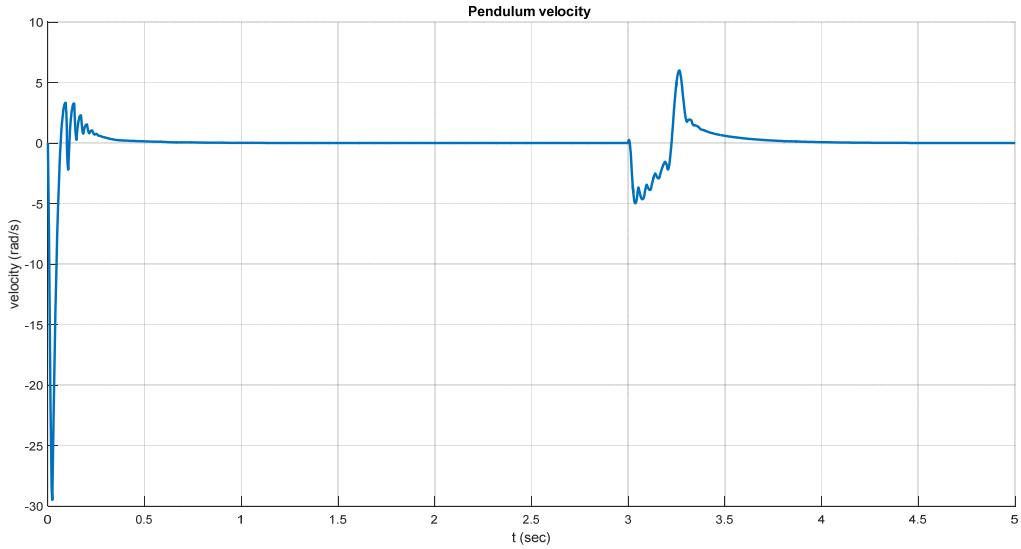


Рисунок 9 – Угловая частота маятника с погрешностью

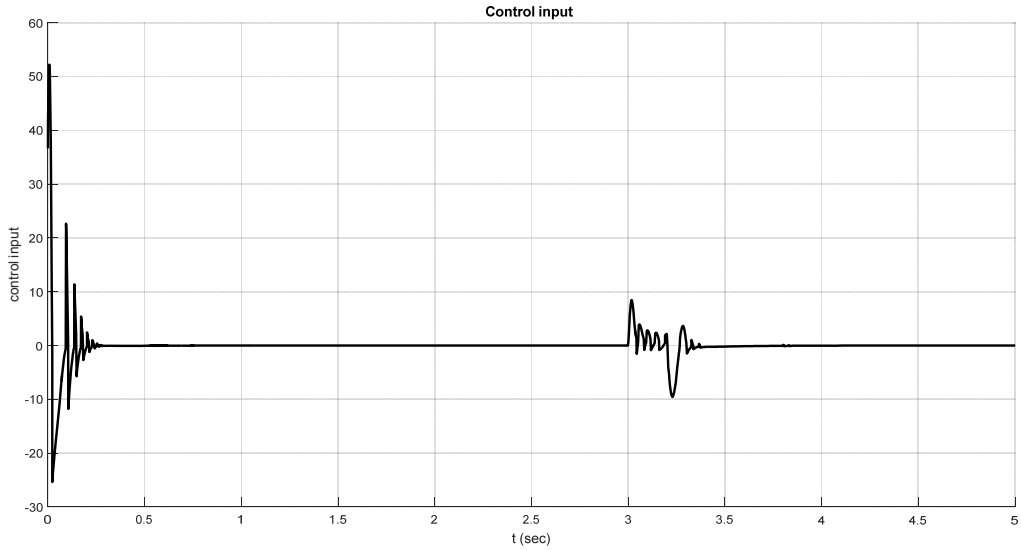


Рисунок 10 – Вход с погрешностью

Как можно видеть на рисунках, погрешность, варьирующаяся в пределах 0,2 секунды, значительно изменила угол маятника с устойчивого положения, а контроллер быстро возвращает систему в стабильное положение. Незначительное количество входа управления и недостаток резких колебаний в ответных реакциях показывает нам хорошую работу контроллера в малоприводной системе.

Контроллер может эффективно привести маятник Фурута к точке равновесия. (X=0) Моделирование показывает стабилизационную возможность контроллера. Следовательно, алгоритм может быть применен к любой другой системе с двумя степенями свободы с незначительными модификациями.

Заключение

В данной работе мы успешно продемонстрировали развитие и применение адаптивной системы управления нейронных сетей, которая привела маятник к его вертикальной позиции и стабилизировала его в условиях нестабильного вертикального положения. Контроллер был выведен из универсального аппроксимационного свойства нейронных сетей, так же были сформулированы адаптационные законы веса. Результаты тестирования доказали эффективность предложенного закона для неопределенной нелинейной малоприводной системы. Предложенный контроллер одновременно стабилизирует ориентационный угол наряду с угловым положением маятника. Кроме того, предложенный алгоритм обобщен и может быть с легкостью применен для любой другой малоприводной системы с двумя степенями свободы.

1. J. Moreno-Valenzuela, "Adaptive Neural Network Control for the Trajectory Tracking of the Furuta

Pendulum," IEEE TRANSACTIONS ON CYBERNETICS, 2016.
2. K. Y. M. K. S. Furuta, "Swing-up control of inverted pendulum," in International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation, 1991.
3. Y.-F. C. ·. A.-C. Huang, "Adaptive control of rotary inverted pendulum system with time-varying uncertainties," Springer, pp. 1112-4, 2013.
4. J. Nelson and L. G. Kraft, "29 Real-time control of an inverted pendulum system using complementary neural network and optimal techniques," in American Control Conference, Baltimore, 1994.
5. S. C. a. Y. Liang, "31 PID-like neural network nonlinear adaptive control for uncertain multivariable motion control systems," IEEE Trans.Ind. Electron., p. 3872–3879, 2009.
6. C.-F. Hsu, "37 Adaptive backstepping Elman-based neural control for unknown nonlinear systems," Neurocomputing, vol. 136, p. 170–179, 2014.
7. C.-M. L. a. R.-G. Y. C.-F. Hsu, "38 Supervisory adaptive dynamic RBF-based neural-fuzzy control system design for unknown nonlinear systems," Appl. Soft Comput.,, vol. 13, p. 1620–1626, 2013.
8. Z. Ping, "39 Tracking problems of a spherical inverted pendulum via neural network enhanced design," Neurocomputing, vol. 106, p. 137–147, 2013.
9. C. W. F. L. Y. Yu, "34 Robust control of a Furuta pendulum," in SICE Annual Conference, 2010.
10. M. T. M. S. M. Khanesar, "22 Fuzzy sliding mode control of rotary inverted pendulum," in IEEE International Conference on Computational Cybernetics, 2007.
11. W. Y. N. Pham Van Cuong, "Adaptive trajectory tracking neural network control with robust compensator for robot manipulators," The Natural Computing Applications, vol. 27, p. 525–536, 2015.
12. R. k. B. Shubhobrata Rudra, "Stabilization of Furuta Pendulum: A Backstepping Based Hierarchical Sliding Mode Approach with Disturbance Estimation," in 7'th International Conference on Intelligent Systems and Control (ISCO), 2013.
13. F. Y. O. B. a. R. Hana Boudjedir, "DUAL NEURAL NETWORK FOR ADAPTIVE SLIDING MODE CONTROL OF QUADROTOR HELICOPTER STABILIZATION," International Journal of Information Sciences and Techniques (IJIST), vol. 2, 2012.
14. S. J. A. Y. F W Lewis, Neural Network Control Of Robot Manipulators And Non-Linear Systems, Taylor & Francis, 1998.
15. F. L. George Saikalis, "ADAPTIVE NEURAL NETWORK CONTROL BY ADAPTIVE INTERACTION," in Proceedings of the American Control Conference, 2001.
16. F. L. Robert D Brandt, "Adaptive Interaction and its Application to Neural Networks," Information Sciences , vol. 121.3, pp. 201-215, 1999.
17. P. K. a. R. L. K. E. S. Sazonov, "30 Hybrid LQG-neural controller for inverted pendulum system," in 35th Southeastern Symp. Syst. Theory (SSST), Morgantown, 2003.
18. M. C. D. Park, "29 Swing-up and stabilization control of inverted-pendulum systems via coupled sliding-mode control method," IEEE Trans. Ind. Electron, vol. 56(9), p. 3541–3555, 2009.

I.V. Titkov[1], A.V. Lopota[2], O.A. Shmakov[2]

SOME FACTS ABOUT DEVELOPING OF CONTROL SYSTEM FOR ACTIVE EXOSKELETON

[1]«GIS Innovation» Ltd., Saint-Petersburg
ilya.titkov@gis-innovations.ru

[2]CRDI RTC, Saint-Petersburg
shmakov@rtc.ru

Abstract

A developing algorithm for hybrid information intelligent system, which provides a control of exoskeleton's components in all usage modes, is proposed in an article. The proposed way ensures modularity and scalable, which allows to increase the functionality of the control object without a global restructuring of system's structure.

Keywords: exoskeleton, control system, hybrid intelligent system.

И.В. Титков[1], А.В. Лопота[2], О.А. Шмаков[2]

КВОПРОСУРАЗРАБОТКИСИСТЕМЫУПРАВЛЕНИЯАКТИВНЫМЭКЗОСКЕЛЕТОМ

[1]ООО «Джи Ай Эс Инновейшн», Санкт-Петербург
ilya.titkov@gis-innovations.ru

[2]ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург
shmakov@rtc.ru

Аннотация

В статье предложен вариант создания гибридной информационно-интеллектуальной СУАЭ, обеспечивающей управление элементами экзоскелета во всех режимах его использования с возможностью дальнейших исследований в данной области. Представленный подход обеспечивает принципы модульности и масштабируемости при проектировании СУАЭ, что позволяет наращивать функциональные возможности объекта управления без глобальной реорганизации структуры СУАЭ.

Ключевые слова: экзоскелет, система управления, гибридная интеллектуальная система.

Введение и постановка задачи исследования

Активный экзоскелет (АЭ) является сложным техническим устройством, в состав которого, как правило, входит большое количество различных устройств: таких как двигатели, датчики, блоки оцифровки, а также модуль обработки и управления.

Наиболее критичными параметрами при проектировании АЭ являются: ограничения массогабаритных характеристик, его способность преодолевать препятствия заданной высоты, возможность выполнять ходьбу, как по ровной поверхности, так и по ступенькам, а также преодолевать наклонные плоскости, кроме того, одним из важнейших параметров при проектировании АЭ является время его автономной работы. Возможный вариант аппаратной части (устройств), используемых в АЭ, представлен на рисунке 1. Здесь условными обозначениями отмечены:

- множество датчиков сил различных типов (на схеме они обозначены цифрами 1, 4, 5);
- электродвигатели (обозначены цифрой 2);
- потенциометры (обозначены цифрой 5);
- блок управления и сбора данных (система управления активным экзоскелетом, СУАЭ).

Устройства, задействованные в схеме АЭ, позволяют уточнить и сформулировать основные и дополнительные требования к СУАЭ вообще (блоку управления и сбора данных в частности).

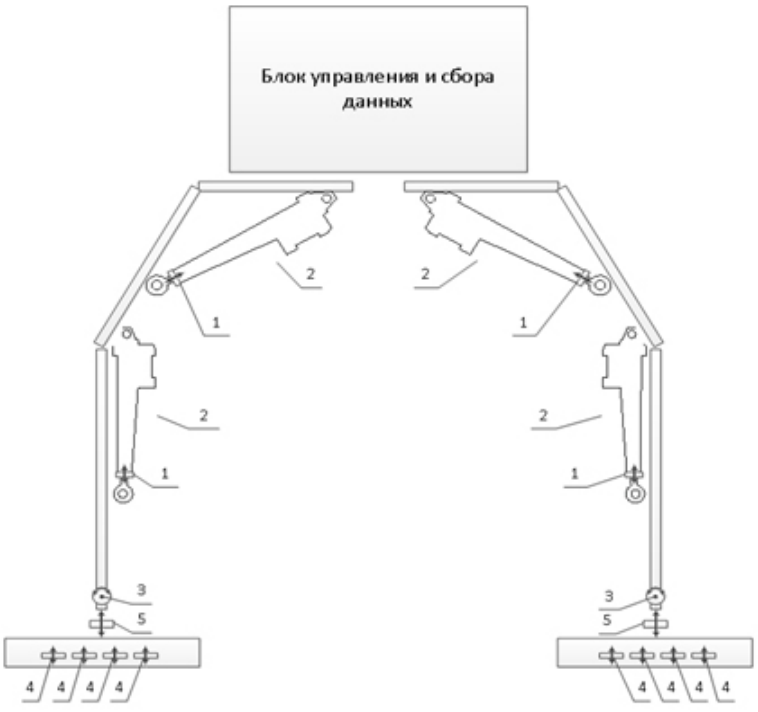


Рисунок 1 – Вариант аппаратной части (устройств), используемых в АЭ

Целью данной работы является создание системы управления АЭ (СУАЭ), обеспечивающей управление, представленными на рисунке 1 элементами, во всех режимах использования АЭ.

Особенности аппаратной части СУАЭ

Как видно из рисунка 1, всю аппаратную часть можно разделить на 2 группы: это датчики и устройства левой конечности и датчики и устройства правой конечности. Две этих группы полностью идентичны, поэтому ниже рассмотрены особенности аппаратной части одной из групп (рисунок 2).

Для того чтобы регистрировать фазу движения ходьбы было принято решение использовать датчики давления, поскольку, как будет показано ниже, в СУЭК используется математическая модель управления АЭ, в основу которой заложен процесс переноса центра масс. Поскольку при ходьбе центр масс плавно переносится по направлению движения, то происходит изменение нагрузки на разные участки стопы. Контролируя и измеряя эту нагрузку можно определить фазу шага.

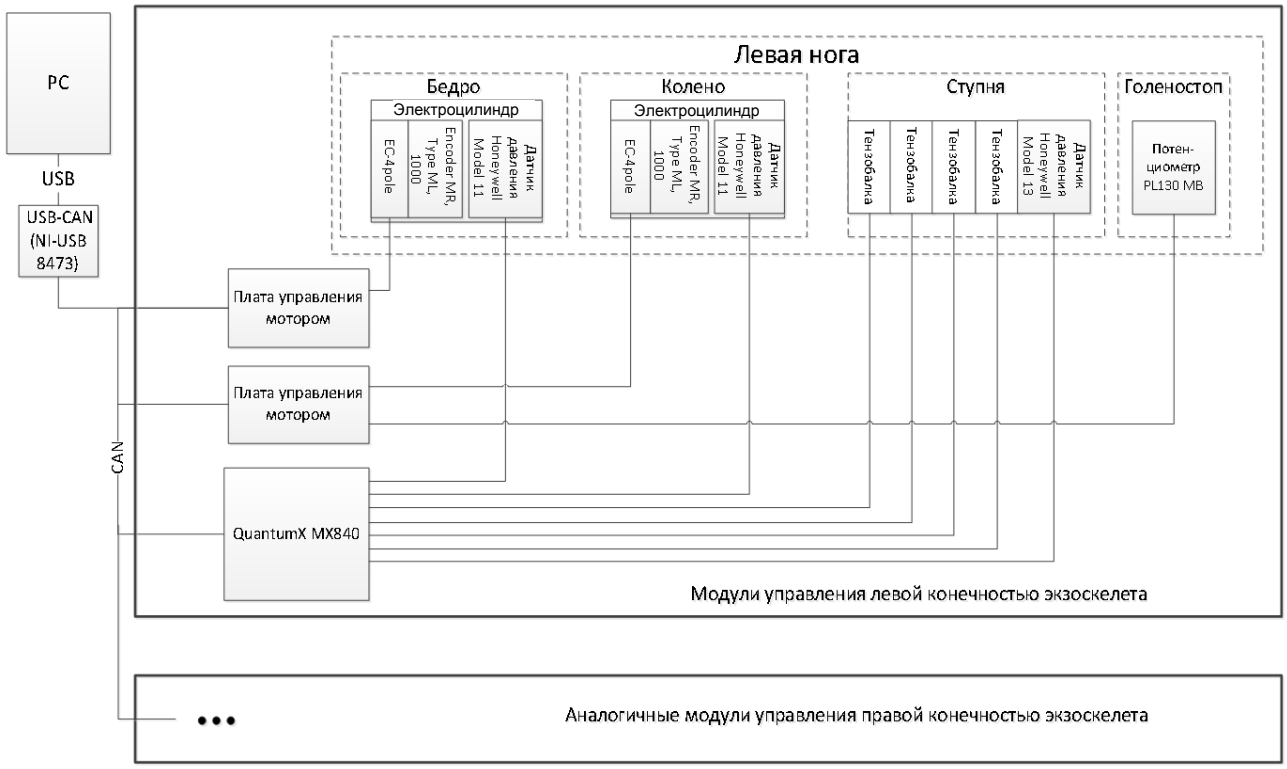


Рисунок 2 – Модули управления конечностьюАЭ

В данном АЭ используются датчики давления, которые изготавливались специально для задачи регистрации фазы шага. Они имеют необходимую чувствительность и динамический диапазон. Для точного определения фазы шага используется 4 датчика в разных частях ступни (см. рис. 1, 2).

Помимо 4 датчиков, которые используются для регистрации фазы шага, в стопе присутствует датчик давления Honeywell Model 13, который используется для того что бы определить на какую из ног приходится нагрузка (т.е. какая из ног является в данный момент опорной). Honeywell Model 13 представляет собой миниатюрный датчик нагрузки с большим динамическим диапазоном, обладает высокой частотой и низкой физической деформацией, что позволяет достигать значения гистерезиса не превышающего 0,5%.

Для упрощения реализации математической модели, используемой в АЭ, было принято решение оснастить АЭ датчиком угла в голеностопном суставе. Поскольку голеностопный сустав в данной конструкции АЭ является пассивным элементом, то угол голеностопного сустава полностью соответствует углу в соответствующем шарнире АЭ. Поэтому для упрощения конструкции и повышения эргономических свойств было принято решение установить датчик угла в шарнир голеностопного сустава. Датчик угла, который можно установить в шарнире, доложен иметь компактные размеры и высокую надежность, поэтому было принято решение использовать потенциометр. Такое решение существенно упрощает систему и тем самым повышает ее надежность. Изменение сопротивления потенциометра прямо пропорционально изменению угла в шарнире голеностопного сустава. В качестве потенциометра используется PL130 MB фирмы Novotechnik.

Помимо датчиков в составе АЭ присутствуют активные элементы – приводы, в качестве которых используются электроцилиндры, основой которых является бесщеточный двигатель EC-4pole 30 мощностью 200 Вт., оснащенный датчиком холла. Поскольку точность датчика холла недостаточна, то в интересах точного позиционирования двигателя, используется энкодер (maxon Encoder MR Type ML), обладающий необходимой точностью – 1000 импульсов на оборот и являющийся еще одним элементом системы управления АЭ. При этом недостатком данного энкодера является его относительность (т.е. отсутствие начального или нулевого значения). Необходимо отметить, что данное обстоятельство легко исправляется калибровкой системы при запуске, что предусмотрено алгоритмом функционирования системы управления АЭ. Для преобразования крутящего момента двигателя в линейное движение используется линейный привод CCBR 32. Для повышения крутящего момента двигателя и, следовательно, усилия на линейном приводе использован разворачивающий редуктор. Необходимо отметить, что одним из важнейших элементов системы управления АЭ являются датчики сжатия (Honeywell Model 11), обеспечивающие СУАЭ данными по определению фазы переноса ноги (для того, чтобы электроцилиндр повторял движения ноги человека). По техническим характеристикам эти датчики близки к датчикам Honeywell Model 13 и имеют такой же гистерезис и такую же нелинейность, разница состоит лишь в том, что Model 11 является датчиком только сжатия, в то время, как Model 13 – датчиком сжатия/растяжения.

Плата управления мотором является основным драйвером управления электроприводами и может управлять моторами с напряжением питания 24 или 36 В., потребляемый ток не более 10А, при этом, возможна перегрузка по току до 25А втечение не более чем на 5 секунд. Кроме того, плата может работать в режим системы управления с обратной связью. Обратная связь может осуществляться по сигналу энкодера или по аналоговому сигналу.Взаимодействие осуществляется по протоколу CAN.

Для сбора данных с датчиков давления используется блок QuantumX MX840, основным преимуществом которого является его универсальность. Так, QuantumX MX840 имеет 8 конфигурируемых каналов, обеспечивающих сбор данных практически с любых типов датчиков, а именно: полный тензомост; полу тензомост; пьезоэлектрические преобразователи; пьезорезистивный мост; терморезисторы (PT100, PT1000); термопары (Типы K, N, R, S, T, B, E, J, C); токопроводящие резисторы; потенциометры; индукционный полный мост; половинный индукционный мост; LVDT; напряжение (± 100 мВ, ± 10 В, ± 60 В); ток (± 20 мА); резисторы (PTC, NTC, KTY, ...); частотный вход; SSI; энкодеры; CAN интерфейс. Наличие API и полностью описанного протокола обращения по протоколу CAN существенно упрощает встраивание QuantumX MX840 в любую систему QuantumX MX840 может передавать данные по Ethernet или CAN.

Центральным элементом СУАЭ является ЭВМ (PC, см. рис. 2). На этапе испытаний это обычный (офисный или бытовой) персональный компьютер или ноутбук под управлением операционной системы Windows. Данный выбор обусловлен простотой и удобством разработки программного кода, кроме того, использование одной платформы на всех этапах исследований упрощает их проведение. Одним из основных недостатков такого подхода является то, что обычный персональный компьютер не обладает интерфейсом CAN и, следовательно, необходим преобразователь интерфейсов.

Обобщенная структура и состав гибридной информационно-интеллектуальной СУАЭ

Обоснуем гибридный подход и выполним декомпозицию гибридной информационно интеллектуальной системы управления активным экзоскелетом (ГИИСУАЭ). Одной из концепций, используемых для разделения сложных систем, на более простые части является концепция уровней с использованием базовых принципов теории многоуровневых иерархических систем и основных положений теории живучести, представляющих систему как совокупность элементов ее составляющих.

В рамках данной работы для облегчения структурного представления СУАЭ авторами предлагается использовать подход, предусматривающий выделение верхнего уровня, описывающего систему в целом, под которым расположен нижний уровень, где описываются явления, используемые верхним уровнем и т.д. Итак, каждый из нижележащих уровней обеспечивает выполнение определенных функций, которые использует вышележащий уровень. В общем виде иерархия ГИИСУАЭ как объектов контроля, диагностики и управления (разнородных технологических систем, входящих в состав активного экзоскелета) при решении задач ГИИСУАЭ может быть представлена схемой, приведенной на рисунке 3. Так, в качестве технологических систем экзоскелета выступают (для левой и правой конечностей): разнородные датчики физических полей (датчики сил и углов), электроцилиндры (технологические системы «колено» и «бедро»), а также технологические системы «голень» и «ступня».

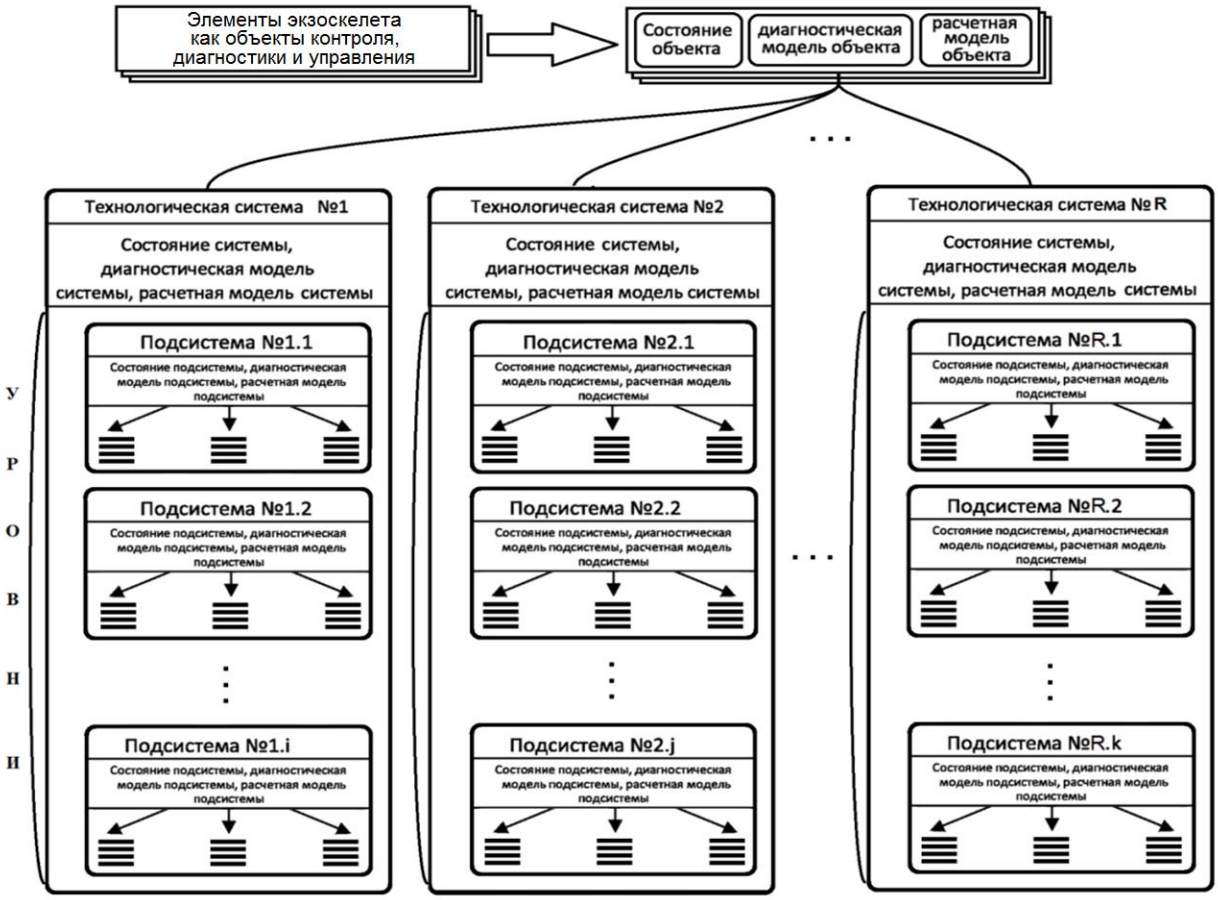


Рисунок 3 – Обобщенный вид иерархии декомпозиции ГИИСУАЭ

Подобный многоуровневый подход к построению системы, по мнению авторов СУАЭ, позволяет решить следующие задачи:

а) повысить производительность ГИИСУАЭ за счет переноса части функциональности с одной подсистемы на другую декомпозируя задачи;

б) снизить эксплуатационные расходы, а также снизить аппаратные требования к системе в целом;

в) минимизировать нагрузки на ГИИСУАЭ в целом;

г) повысить эффективность использования вычислительных ресурсов при решении общих задач (путем концентрации нагрузки);

д) повысить производительность и доступность ГИИСУАЭ путем дублирования и резервирования подсистем с элементами оптимизации распределения нагрузки на элементы ГИИСУАЭ (подсистемы);

е) повысить структурированность программных систем (баз данных, баз знаний, программного обеспечения) за счет реализации компонентов в виде независимых модулей (объектов), обеспечить возможность комплектации готовой системы из таких модулей – основной принцип разработки современных систем – принцип модульности;

ж) реализовать потребность в интеграции различных задач (для разных моделей экзоскелетов или при расширении функциональных возможностей экзоскелета) в едином интерфейсе и протоколах.

Представление СУАЭ как многоуровневой структуры предоставляет целый ряд преимуществ, основными из которых являются:

- каждый отдельный уровень ГИИСУАЭ можно воспринимать как единое целое, независящее от других уровней;
- при необходимости можно выбирать альтернативные реализации основного уровня;
- любой из созданных уровней может являться основой для группы других уровней;
- минимальная зависимость между уровнями.
- Наряду с перечисленными преимуществами схема распределения на уровни обладает рядом определенных недостатков, к которым относятся:
- уровни позволяют многое эффективно инкапсулировать, при этом существуют ограничения, связанные с тем, что изменение одного уровня связано с необходимостью внесения каскадных изменений в остальные уровни;

- при нерациональном планировании ГИИСУАЭ, наличие избыточных уровней может снижать производительность системы в целом. Моделируемые процессы подвергаются преобразованиям их представления в различные виды при переходах из уровня в уровень. Несмотря на это, инкапсуляция рассматриваемых функций позволяет достичь весьма существенного преимущества.

Наиболее трудным процессом при разработке многоуровневой ГИИСУАЭ является формулирование сути и граничных условий функционирования каждого уровня (слоя).

При построении структуры ГИИСУАЭ строиться модель системы, где необходимо определить: классические элементы системы, модели обработки знаний, которые реализуются интеллектуальной системой управления. По сравнению с традиционной системой в ГИИСУАЭ новыми элементами являются все интеллектуальные преобразования или элементы управления знаниями, которые связаны с реализацией искусственного интеллекта. К ним можно отнести: использование технологий принятия решений, семиотических сетей, базы знаний, экспертных систем, нечеткой логики, ассоциативной памяти, управления структурной динамикой и т. д.

Выделим в рамках работы несколько уровней детализации (при решении задач управления активным экзоскелетом):

- задачи принятия решений при определении «желания» оператора экзоскелета и организационного управления;
- задачи контроля технического состояния технологических систем и в случае необходимости их отключения для обеспечения управляемости экзоскелетом;
- задачи прогнозирования и оценки технического состояния ГИИСУАЭ.

Каждый из перечисленных уровней определяется различной глубиной детализации описания процессов в нем протекающих и особенностями представления пространства состояний.

К основным существенным характеристикам, присущим всем иерархическим системам можно отнести:

- при вертикальной декомпозиции системы – последовательное вертикальное расположение подсистем основной системы;
- прямая зависимость действий подсистем верхнего уровня от фактического исполнения подподсистемами нижних уровней своих функций;
- приоритет действий подсистем верхнего уровня над подподсистемами.

Перейдем к более детальному описанию иерархии декомпозиции ГИИСУАЭ и формализуем в общем виде многоуровневый подход к построению такой системы.

Как показано на рисунке 3, иерархия слоев (уровней) представляет собой совокупность вертикально расположенных решающих подсистем S_i. Каждая из этих подсистем может быть:

- описана следующим образом $S_i : C_i \to C_{i-1}$;
- представлена в виде решающего элемента (решателя, более детальное описание, которого бут рассмотрено ниже). Т.е., определяется множеством задач, подлежащих решению $D_i(\gamma_i)$ $\gamma_i \subset C_i$ и преобразование T_i такое, что для любого входа γ_i выход $\gamma_{i-1} = S_i(\gamma_i)$ определяется функцией $\gamma_{i-1} = T_i(x_i)$, где x_i – решение задачи $D_i(\gamma_i)$.

  Таким образом, имеем:

- входы γ_i являются параметрами (которые задаются непосредственно вышестоящим элементом), конкретизирующими решаемые задачи в S_i ;
- выходы γ_{i-1}, получающиеся после применения преобразования T_i, являются в свою очередь парамтрами, задаваемыми элементу, находящемуся ниже.

Итак, отметим основные преимущества построения ГИИСУАЭ с использованием концепции многоуровневого подхода.

На сегодняшний день существует широкий спектр систем различного назначения, и иерархическое упорядочение зачастую связано с необходимостью корректировки структуры этих систем, поскольку объективно существует необходимость повысить эффективность их работы. При этом для создания комплексной (или «интегрированной») системы управления редко имеется возможность кардинальной перестройки и рационализации всего комплекса в связи с наличием ряда ограничений (технических, экономических и социальных). Поэтому, приходится учитывать имеющейся системы на нижнем уровне (электроцилиндры и различные датчики с их собственными системами управления), добавлять к ним систему управления высшего уровня и тем самым осуществлять интеграцию управления новой системой.

Разработав иерархию необходимых задач и подзадач, можно конкретизировать цель, для достижения которой создается многоуровневая ГИИСУАЭ.

Многоуровневая децентрализованная ГИИСУАЭ позволяет обнаруживать изменения в процедуре выработки решений (фактически, до ее вызова), которые вызваны изменениями в протекании подпроцесса, что приводит к снижению временных затрат и технических ресурсов. В подобных условиях ГИИСУАЭ адаптируется быстрее.

В случае необходимости решения сложных крупномасштабных задач средствами ГИИСУЭ, многоуровневый подход позволяет эффективнее использовать имеющиеся ресурсы. Конечно, данное утверждение можно легко подвергнуть критике, поскольку, в целом применимость такой концепции зависит во многом от корректно-подобранной многоуровневой структуры.

Поскольку сложно формализуемые факторы оказывают существенное влияние на характер стохастических процессов, протекающих в ГИИСУАЭ, выполнить предварительную оценку производительности разрабатываемой и основанной на некоторой универсальной математической модели, многоуровневой ГИИСУАЭ, крайне затруднительно.

Оценка вероятностно-временных характеристик подсистем и элементов реальной масштабной ГИИСУАЭ (если она рассчитана на раннем этапе проектирования) может сэкономить значительные средства при ее внедрении. Это обусловлено возможностью снижения аппаратных требований к критическим компонентам ГИИСУАЭ за счет оптимизации ее структуры.

Таким образом, по всей видимости, перспективными в настоящее время могут являться только такие подходы, которые используют гибридные информационно-интеллектуальные системы, где должны быть учтены особенности отмеченных выше уровней (слоев), при этом, эти системы включали бы достоинства составляющих их моделей и исключали их недостатки.

Общая математическая постановка задачи синтеза СУАЭ

Как было отмечено выше, в рамках работы СУАЭ предлагается рассматривать и проектировать как ГИИСУАЭ с использованием концепции многоуровневого подхода, обладающую рядом преимуществ, также рассмотренных выше. Разработав иерархию необходимых задач и подзадач, можно конкретизировать цель, для достижения которой создается многоуровневая ГИИСУАЭ. При этом алгоритмы и положения, рассмотренные ниже, позволяют синтезировать ГИИСУАЭ практически для любой цели, а также расширять функциональные возможности уже существующей системы для решения новых задач (обеспечение требований модульности и масштабируемости разрабатываемой СУАЭ).

С целью определения задачи системы ГИИСУАЭ $D_i(\gamma_i)$ зададим отображения двух типов множества данных: f_1 – характеризует содержательную сторону задачи и f_2 – характеризует функциональное построение задачи.

Первый тип отображения f_1, характеризующий содержательную сторону задачи ГИИСУАЭ, задается выражением:

$$f_1 : \beta_{1i} \times \beta_{2i} \times \beta_{3i} \times \beta_{4i} \times \beta_{5i} \times \beta_{6i} \to \gamma_i \quad , \qquad (1)$$

где: β_1 – цель действий управляемых объектов (электроприводов и поршней);

β_2 – описание управляемых объектов (электроприводов и поршней);

β_3 – описание условий, в которых протекает функционирование управляемых объектов (электроприводов и поршней), полученное от датчиков различного назначения;

β_4 – множество объектов воздействия (математические модели поведения экзоскелета в различных ситуациях, т.е. мат. модели наклона корпуса, подъема и т. д.);

β_5 – алгоритм работы СУАЭ в целом (общий алгоритм);

β_6 – алгоритмы возможных движений оператора активного экзоскелета.

Обоснование и описание элементов β_1 ,β_2 и β_4 выполнено при разработке математических моделей движения активного экзоскелета для системы управления, а описание элементов β_2 , β_5 и β_6 - выполнено при разработке алгоритмов управления совместной работой приводов для всех фаз движения экзоскелета.

Декартово произведение конкретных (i-тых) перечисленных формализованных описаний β_{ji}, где j= 1..6 образует конкретную (j-тую) задачу, записанную в общем виде.

Таким образом, с содержательной точки зрения, задача ГИИСУАЭ – это совокупность формализованных описаний $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5, \beta_6$, отражающих объективные законы движения экзоскелета и обеспечивающих возможность управления им для достижения цели управления с минимальными затратами.

В графическом виде каждую задачу ГИИСУАЭ с содержательной точки зрения можно представить как замкнутый граф (рисунок 4), образованный вершинами – составными частями задачи, соединенными ненаправленными дугами.

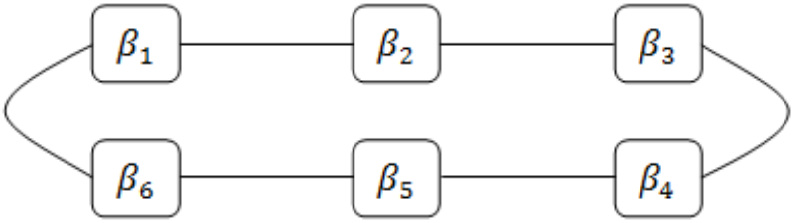


Рисунок 4 – Содержательное описание задачи ГИИСУАЭ

Второй тип отображения f_2, характеризующий функциональное построение задачи, задается выражением:

$$f_2 : B^t \times I^t \times M^t \times O^t \times F^t \times L^t \to r_t \quad , \tag{2}$$

где: B^t, I^t, M^t, O^t – подмножества, соответственно, входных *I'* и выходных *B'* данных, информационных массивов *M'* и операторов *O'* обработки информации, включенных в конкретную задачу $D_t(r_t)$;

F^t – подмножество функций специализированного программно-математического обеспечения, возложенного на конкретную задачу $D_t(r_t)$;

L^t – множество взаимосвязей между составными частями элемента и самими элементами, образующих структуру информационного взаимодействия.

Таким образом, с функциональной точки зрения, задача ГИИСУАЭ представляет собой совокупность формализованных составных ее частей *B, I, M, O* размещенных в пространстве и соединенных с помощью *L* взаимосвязей таким образом, чтобы они в совокупности выполняли функции *F*. В общем виде графическое представление функционального описания задачи ГИИСУАЭ представлено на рисунке 5.

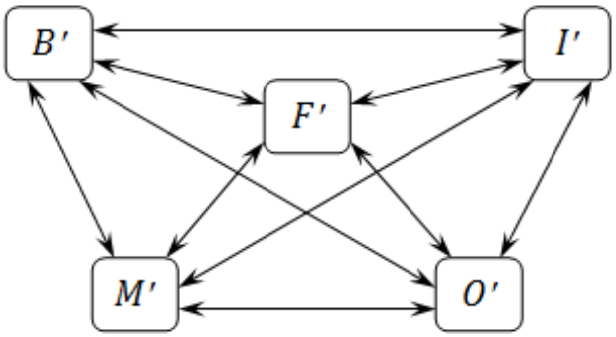


Рисунок 5 – Функциональное описание задачи ГИИСУАЭ

Необходимо отметить, что входные и выходные данные, информационные массивы и операторы обработки информации являются основными функциональными частями специализированного программно-математического обеспечения (СПМО). Отметим три важных свойства каждой задачи системы:

Задачу необходимо рассматривать как однофункциональный объект, предназначенный для достижения только одной цели из множества целей, стоящих перед ГИИСУАЭ. Эта цель находит выражение в функциях математического обеспечения, заложенных в задаче и может решаться различными методами имитации интеллектуальной деятельности (экспертных систем, искусственных нейронных сетей, аналитических моделей, нечетких систем, генетических алгоритмов, имитационных статистических моделей и др.);

Составные части задачи вступают в такого рода взаимодействия, в результате которых образуется новое качество, не присущее исходным объектам взаимодействия. Таким новым качеством, например, может служить способность обеспечения автоматизации процесса управления экзоскелетом с

повышением степени обоснованности принимаемых решений и их оперативности (применительно к СУАЭ: способность системы автоматически определить «желание» оператора по перемещению).

При комплексировании множества задач в составе ГИИСУАЭ проявляются их интегративные свойства. Например, если в группе задач общей для каждой из них является содержание части β_6, то происходит концентрация функций управления. Общие части $\beta_1, \beta_2, \beta_4$ в группе задач тоже несут общее качество: создание условий для централизованного управления на базе ГИИСУАЭ. Перечисленные события являются примерами правил формирования знаний из существующих данных, хранящихся в виде реляционных таблиц баз данных (БД) и баз знаний (БЗ), полученных в ходе проведения натурных экспериментов и выявления знаний из полученных данных

Математическая формулировка классификации задач, решаемых СУАЭ

После выполненного анализа ситуаций, в которых будет применяться АЭ, формулировки целей и задач СУАЭ, а также конкретизации необходимых априорных материалов для эффективного решения этих задач в конкретных ситуациях, необходимо математически обобщить и систематизировать задачи ГИИСУАЭ.

Решение основных задач, возлагаемых на ГИИСУАЭ, осуществляется в рамках информационной среды, которая отражает состав и объективно существующие закономерности взаимосвязей элементов АЭ и внешнего мира, имеющих самое непосредственное отношение к решаемым ГИИСУАЭ задачам. Информационная ситуация является частичным отражением информационной среды средствами, имеющимися в распоряжении ГИИСУАЭ. При этом, элементом информационной среды (информационной ситуации) является ее составная часть, не подлежащая декомпозиции при рассмотрении конкретной информационной ситуации. В рамках работы внутренняя структура элемента не является предметом рассмотрения, при этом существенны только те его свойства, которые определяют взаимодействие данного элемента с другими или влияют на свойства ситуации в целом.

В качестве таких понятий в первую очередь выступают объекты (но, не только электроприводы) и их характеристики. В данном контексте объектами будем называть элементы информационной среды. В общем случае объект представляет собой некую реальность (в нашем случае – технологические системы ГИИСУАЭ, например, множество датчиков, как поставщиков разнородной информации и т.д.). Эта информация может быть описана конечным набором знаков (например, в реляционной или объектной базе данных). Тип объекта определяется значениями описывающих его характеристик (признаков, свойств), например, таких как технические характеристики, углы, создаваемые поршнями, направление и скорость движения, состав технологических систем и т. д. Каждая характеристика представляет собой динамический диапазон качественных различий объектов. Число таких характеристик может быть сколь угодно велико, отображая многообразие реальных объектов. Поэтому каждый объект является вектором в пространстве характеристик.

Кроме множеств объектов и характеристик к информационной среде относится также множество параметров, по которым ведется контроль за информационной средой и производится оценка информационных ситуаций. Таким образом, под *информационной средой* будем понимать:

$$\Omega = \{U, Y, K\}, \tag{3}$$

где: $U=\{u_1, u_2, \ldots, u_{n^*}\}$ – множество объектов информационной среды;

$Y=\{y_1, y_2, \ldots, y_m\}$ – множество характеристик, которыми описываются объекты U_j, $j = \overline{1, n^*}$

$K=\{k_1, k_1, \ldots, k_x\}$ – множество параметров, по которым ведется контроль за информационной средой и производится оценка информационных ситуаций.

При этом объекты $u_j \in U$ подразделяются на K различных типов, в соответствии с чем, множество U можно рассматривать как:

$$U = \{U_1, U_2, \ldots, U_q, \ldots, U_k\}, \tag{4}$$

где: U_q – множество объектов q-го типа, $q = \overline{1, K}$.

Основываясь на понятии информационной среды, в общем виде задачи обработки информации могут быть разделены на *три группы* и рассматриваться как:

$$R = \{R_1, R_2, R_3\}. \tag{5}$$

Основные группы задач ГИИСУАЭ перечислены по классификационной схеме, разработанной и представленной на рисунке 6.

Если ввести дискретное время (такты) $T = \{t_1, t_2, \ldots, t_n\}$, тогда каждая характеристика $y_{i\bullet}$ конкретного объекта u_j в момент t_i, принимает определенное значение $y_{i\bullet}(t_i)$, лежащее на отрезке $[y_1, y_1]$ возможных значений данной характеристики. Таким образом, в момент t_i объект может быть описан вектором

$$u_j(t_i) = \{y_{j1}(t_i), y_{j2}(t_i), \ldots, y_{jm'}(t_i)\}, \quad (6)$$

где: $m' \leq m$.

Накопление и ведение множества векторов объектов, информационной среды являются содержанием задач группы R_1 (рисунок 6).

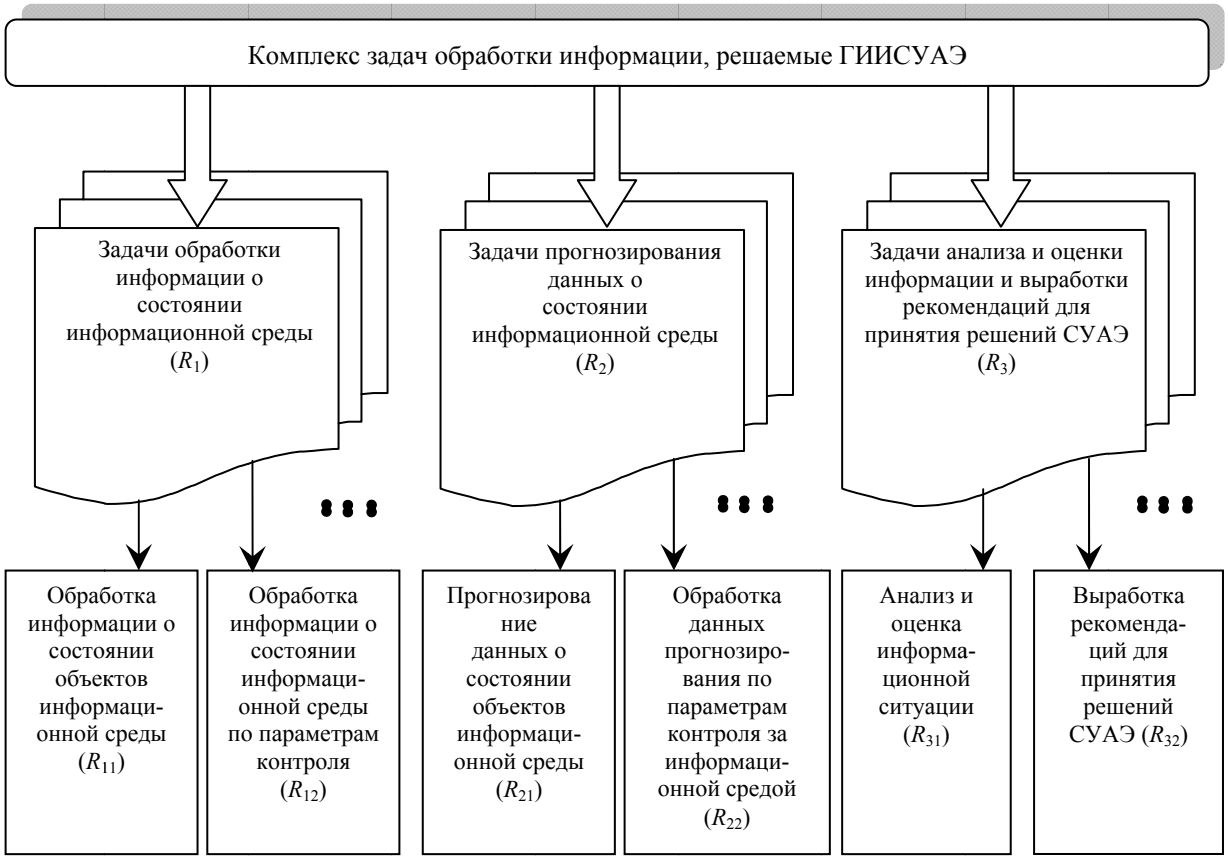


Рисунок 6 – Задачи, решаемые ГИИСУАЭ

В общем случае значения характеристик объекта изменяются во времени. Если в момент t_i характеристика $y_{i\bullet}$ объекта u_j имела значение $y_{i\bullet}(t_i)$, то в момент времени t_{i+1} она будет иметь значение:

$$y_{i\bullet}(t_{i+1}) = y_{i\bullet}(t_i) + \Delta\sigma_{y_{i\bullet}}, \quad (7)$$

где: $\Delta\sigma_{y_{i\bullet}}$ – показатель изменения значения характеристики $y_{i\bullet}$ объекта u_j.

Выявление законов распределения $\Delta\sigma_{y_{i\bullet}}(x)$ и на их основе осуществление прогнозирования данных о состоянии информационной среды является содержанием задач группы R_2 (см.рис. 6).

Как было отмечено выше, решение основных задач, возлагаемых на ГИИСУАЭ, осуществляется под непосредственным влиянием информационной среды. Информационная ситуация является отражением информационной среды средствами, имеющимися в распоряжении активного экзоскелета.

Пусть в момент t_i на базе совокупности состояний элементов информационной среды Ω_{ε_i}, зафиксирована ситуация $\Omega^*_{\varepsilon_i}$. Таким образом, на основе анализа зафиксированной ситуации определяется класс, к которому она принадлежит и осуществляется выработка рекомендаций для принятия решения, эти события и являются содержанием задач группы R_3 (см.рис. 6).

Таким образом, в соответствии с предложенной классификацией можно формализовать множество задач, решаемых ГИИСУЭ, к которым в настоящий момент отнесены:

- диагностика работоспособности технологических систем активного экзоскелета и отключение приводов в случае их неисправности (для обеспечения свободного движения оператора);

- формирование и отображение текущей и прогнозируемой обстановки по фазе, в которой находится активный экзоскелет;

- решение расширяемого множества частных задач СУАЭ (путем добавления математических моделей различного пространственного перемещения активного экзоскелета).

Другими словами, введенные определения позволяют на формализованном языке подробно описать каждую из перечисленных групп задач и любые новые задачи СУАЭ с целью их решения и дальнейшего включения в ГИИСУАЭ. В качестве элементов описания при этом используются различные хранилища данных (как правило – реляционные БД), документы, информационные массивы, операторы преобразования, анализа, обработки и распределения информации. А применение, например, методов технологии извлечения знаний (KDD) позволит извлекать знания из указанных наборов данных.

Концептуальная модель СУАЭ

Как было показано выше, для повышения эффективности системы управления АЭ, она должна быть построена на основе интегрированной, основанной на знаниях, гибридной информационно-интеллектуальной системы. Это обусловлено возможностью получения в системе ряда достоинств современных технологий интеллектуального анализа данных и нивелирования ряда их недостатков.

В рамках работы для эффективного решения задач управления АЭ в состав СУАЭ предложено включить следующие модули: экспертную систему, нейронную сеть, базу данных и базу знаний, программно-графический и программно-языковой компоненты (рисунок 7). Наличие данных модулей позволят, во-первых, обеспечить выполнение требований к СУАЭ (рассмотренных выше) и во-вторых, обеспечить эффективную технологию настройки СУАЭ и модульность этой системы (т.е. возможность расширения ее функциональных возможностей в дальнейшем).

Рисунок 7 – Облик гибридной масштабируемой интеллектуальной СУАЭ

Гибридный подход полагает, что только синергетическая комбинация нейронных и символьных моделей достигает полного спектра когнитивных и вычислительных возможностей. Например, экспертные правила умозаключений могут генерироваться нейронными сетями, а порождающие правила система управления получает с помощью статистического обучения. Таким образом, гибридная информационно-интеллектуальная система управления будет значительно более эффективной, чем просто сумма различных концепций по отдельности. Именно в этом заключается первое из двух основных преимуществ гибридного подхода. Вторым, но не менее важным его преимуществом является обеспечение принципа модульности, т.е. в возможности расширять функции системы управления путем добавления модулей расчетов, обучения новых нейронных сетей и формирование новых правил баз знаний для использования результатов их работы. Т.е. в рамках исследования разрабатывается масштабируемое «*ядро*» системы управления и демонстрируются возможности его использования (практической реализации) на частном примере хождения по ровной поверхности.

Экспертная система является интегрирующим модулем и связана с другими компонентами системы управления. Вспомогательные подсистемы, такие как база данных (БД), база знаний (БЗ) и модуль статистической обработки экспериментальных данных, служат связующими звеньями экспертной

системы и используется в основном при обработке экспериментальных данных и «обучении» системы управления.

Понятно, что с вводом информации в памяти системы управления должны осуществляться процессы формирования ассоциативных связей, иерархического упорядочения, классификации и формирования правил поведения. Этим требованиям удовлетворяют растущие пирамидальные сети (РПС) – программно-языковой компонент (см. рис. 7), которые являются «сетевой памятью», самонастраивающейся на структуру входной информации системы управления. В отличие от нейросетей эффект адаптации в РПС достигается без введения априорной избыточности сети. Исследования, выполненные на сложных данных большого объема, показали высокую эффективность применения РПС для решения аналитических задач. Такие качества, как простота внесения изменений, совмещение процессов ввода информации с ее классификацией, обобщением и выделением существенных признаков, высокая ассоциативность, делают РПС важным компонентом СУАЭ.

Итак, ниже рассматриваются элементы гибридной СУАЭ, интегрирующей стратегии нейросетевых моделей и методы обработки нечетких данных для построения классификационных правил определения фазы движения АЭ и интерпретации анализируемой информации с помощью разрабатываемой системы управления (на примере данных, получаемых от датчиков, находящихся в стопах АЭ, результаты обработки этих экспериментальных данных подробно представлены в разделе 4 настоящего отчета). В систему управления загружаются записи сигналов, на основе которых формируется представление вторичных признаков. Вторичные признаки приводятся к нечеткому виду, что позволяет создавать правила классификации сигналов в понятных эксперту вербальных терминах. Правила строятся путем интерпретации закономерностей, содержащихся в иерархической структуре, напоминающей нейросеть и построенной в процессе обучения. Каждое правило представляет собой нечеткую модель одного из классов сигналов. После чего, полученные продукционные правила должны проходить проверку у эксперта и формироваться в базу результирующих знаний.

К основным элементам СУАЭотносятся: модули предобработки, постобработки, формирования иерархической структуры нейроподобной сети (ИСНС), выделения описаний классов, нечеткого логического вывода, редакторы выборки объектов и лингвистических переменных, а также модуль визуализации данных и формирования БЗ. Логические связи этих элементов представлены на рис. 8.

Рисунок 8 – Обобщенная логика взаимодействия модулей СУАЭ

Модуль предобработки объектов предназначен для первичной обработки данных (включающей, например, фильтрацию, нормализацию, автоматическое определение корреляционных функций исследуемых сигналов, расчет аттрактора и спектральной плотности мощности, формирование на основе аттрактора вектора вторичных признаков). Результатом работы модуля является вектор X, представляющий информацию (сигнал) набором дискретных признаков. Модуль постобработки осуществляет преобразование вектора X в лингвистическую шкалу и переход к нечетким признакам. Модуль формирования ИСНС предназначен для построения графовой модели (G) классов обучающей выборки (ОВ). Структура G отражает связи между признаками ОВ. Модуль выделения описаний классов из ИСНС предназначен для выделения наборов продукционных правил из построенной ИСНС. Модуль нечеткого логического вывода решает задачу классификации (например, фазы ходьбы экзоскелета) с помощью построенных продукционных правил и вычисляет значение функции соответствия объекта описанию класса (конкретной фазе движения).

S.F. Jatsun, S.I. Savin, A.S. Jatsun, A.V. Malchikov

STUDY OF CONTROLLED FRONTAL PLANE MOTION OF AN EXOSKELETON IN THE VERTICAL BALANCE RECOVERY REGIME

Southwest State University, Kursk, Russia
teormeh@inbox.ru, savin@swsu.ru, ayatsun@ya.ru, zveroknnp@gmail.com

Abstract

In the present paper an exoskeleton for people with impaired walking abilities is considered. A mathematical model for the case when the motion only takes place in the frontal plane is given. The paper studies exoskeleton push recovery, applied to the case when the exoskeleton is standing on a platform that rapidly accelerates for a short period of time. An algorithm for vertical balance recovery was presented. The method requires the exoskeleton to make one step before the balance is recovered. Numerical simulation results and their analysis are presented. The simulation showed that the discussed algorithm is valid.

Keywords: exoskeleton, vertical balance recovery, control system, mathematical model.

Introduction

At present exoskeletons are finding applications in medicine, rehabilitation, industry and military. They can be used to enhance the abilities of the user, which includes restoring the ability to walk to disabled people and the elderly [1-3]. At the same time the growing use of exoskeletons brings the necessity to improve their safety and quality of their work in general. This requires the study of different regimes of the controlled motion of the exoskeletons, which would then allow to and create the necessary engineering tools for designing those devices.

There are publications that study the control of exoskeletons. In those papers the questions of controlled walking [3-6] and sit-to-stand motion [7-11] are discussed. One of the main approaches is to use zero moment point concept (ZMP), which provides a criteria for whether or not the exoskeleton is vertically balanced [12-14]. The topic of push recovery (reclaiming vertical stability after a sudden change of the velocity of the center of mass, relative to the supporting surface) for exoskeletons have not been sufficiently studied. In the literature on bipedal waking robots there are a some well known methods that deal with the control of the robot motion in the described regime [15-19].

There are two distinct cases of vertical balance recovery. In the first case there is a force that acts on the mechanism during a short period of time. This case corresponds to a situation when the exoskeleton user has collided with another moving object. In the second case the exoskeleton is standing on a platform that rapidly changes its velocity during a short period of time. This case corresponds to a situation when the exoskeleton user is using a public transport. In this paper the simulation will be given for the second case.

1. Mathematical model

Let's consider an exoskeleton, which consists of a par of legs and arms, attached to the exoskeleton's torso. We are studying the case when the exoskeleton is standing on straight legs, and of the exoskeleton's feet remains motionless on the ground. We will also assume that the exoskeleton's arms are only moving in the shoulder joints, rotating in the frontal plane. Those assumptions allow us to model both legs and arms of the exoskeleton as single links. The motion of each link only takes place in the frontal plane. In fig.1 an analytical diagram of the exoskeleton's model is shown.

In fig. 1 points O_i are joints, equipped with motors, which create torques M_i. Points C_i are the centers of mass of the links, φ_i are absolute angles, that determine the orientation of the links relative to the horizontal line. The links have masses m_i.

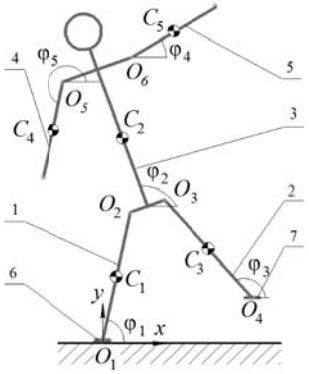


Figure 1 – Analytical diagram of the exoskeleton; 1-7 – first to seventh exoskeleton links

For the case when point O_1 remains motionless we can use the following vector of generalized coordinates:

$$\vec{q} = [\varphi_1 \quad \varphi_2 \quad \varphi_3 \quad \varphi_4 \quad \varphi_5]^{\mathrm{T}}. \tag{1}$$

The equations of motion of the mechanism can be then written in the vector form:

$$\mathbf{A}(\vec{q})\ddot{\vec{q}} + \vec{C}(\vec{q},\dot{\vec{q}}) + \vec{G}(\vec{q}) + \vec{\Phi}(\vec{q}) = \mathbf{B}\vec{M}, \tag{2}$$

where $\vec{C}(\vec{q},\dot{\vec{q}})$ is a vector of generalized inertial forces, $\mathbf{A}(\vec{q})$ is the generalized matrix of inertia, $\vec{G}(\vec{q})$ is a vector of generalized gravitational forces, $\vec{\Phi}(\vec{q})$ is a vector of generalized dissipative forces, $\mathbf{B}$ is a matrix that transforms the vector of motor torques $\vec{M}$ into the vector of generalized forces generated by the motor torques, $\vec{M} = [M_1 \quad M_2 \quad M_3 \quad M_4 \quad M_5]^{\mathrm{T}}$.

This differential vector equation can be used to simulate the exoskeleton motion. In the next sections we will consider the case when the torques $\vec{M}$ are generated by a feedback control system.

2. Vertical balance recovery strategy

In this paper a two stage control algorithm proposed in paper [20] for vertical balance recovery is considered. The first stage starts after the center of mass of the exoskeleton acquires a nonzero velocity. The stage is t_1 seconds long. During this stage the point O_4 leaves the supporting surface and the exoskeleton is leaning to the side. In the beginning of the first stage the control system evaluates how far the center of mass of the mechanism will move during the time t_1, if it's velocity doesn't change. Using this information the control algorithm generates the coordinates for the point O_4 that the point should reach by the end of this stage of motion. It also calculates the desired trajectory for both the center of mass and the point O_4.

The second stage of the motion lasts for t_2 seconds. It starts when point O_4 regains contact with the supporting surface. During this stage the control system slows down the center of mass till it stops. Then it moves it towards the center of the support polygon. Point O_4 remains motionless during this stage.

As it was discussed, the algorithm generates the desired trajectories for two points: $\vec{r}_{O4}$ and $\vec{r}_C$. The desired trajectory $\vec{r}^*_C = [x^*_C \quad y^*_C]^{\mathrm{T}}$ for the center of mass is defined as follows:

$$x^*_C = \begin{cases} x_C(0) + \dot{x}_C(0)\cdot t \quad if \quad t \le t_1 \\ \sum_{p=0}^{5}\left(c_{1,p}\cdot t^p\right) \quad if \quad t > t_1 \end{cases}, \; y^*_C = \begin{cases} y_C(0) + \dot{y}_C(0)\cdot t \quad if \quad t \le t_1 \\ \sum_{p=0}^{5}\left(c_{2,p}\cdot t^p\right) \quad if \quad t > t_1 \end{cases} \tag{3}$$

where $x_C(0), y_C(0)$ are the Cartesian coordinates of the center of mass right after it gained velocity (right at the beginning of the work of the algorithm), $\dot{x}_C(0), \dot{y}_C(0)$ are the its velocity components at that same time, $c_{1,p}$ and $c_{2,p}$ are polynomial coefficients.

The desired trajectory $\vec{r}^*_{O4} = [x^*_{O4} \quad y^*_{O4}]^{\mathrm{T}}$ for point O_4 is given by the following formulas:

$$x^*_{O4} = \begin{cases} \sum_{p=0}^{5}\left(c_{3,p}\cdot t^p\right) \quad if \quad t \le t_1 \\ x_s \quad if \quad t > t_1 \end{cases}, \; y^*_{O4} = \begin{cases} \sum_{p=0}^{5}\left(c_{4,p}\cdot t^p\right) \quad if \quad t \le t_1 \\ 0 \quad if \quad t > t_1 \end{cases} \tag{4}$$

where $c_{3,p}$ and $c_{4,p}$ are polynomial coefficient, x_s is the desired position of the foot at the end of the vertical balance recovery motion. It is determined by the next formula:

$$x_s = x_C(0) + \mu\dot{x}_C(0)t_1 \tag{5}$$

where $\mu > 1$ is a constant coefficient that determines how far from the edge of the support polygon the foot should be placed. The desired position of the foot is chosen such that the center of mass would remain inside the support polygon during the second stage of the motion. The larger the coefficient μ is chosen to be, the further from the edge of the support polygon the center of mass end up be at the beginning of the second stage. Coefficients $c_{3,p}$ and $c_{4,p}$ are chosen such that the point O_4 would have zero velocity and acceleration at the beginning and the end of its motion. More details on the algorithm are given in [20].

3. Description of the control system

The control system of the exoskeleton uses proportional-differential (PD) controller with adaptive parameters. The diagram of the control system is given in fig. 2.

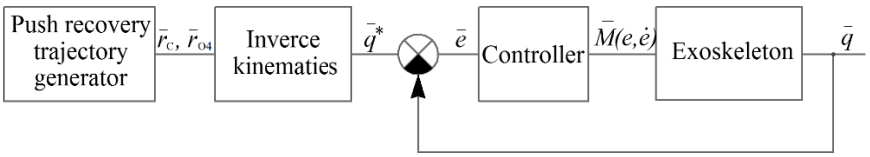


Figure 2 – Control system diagram

In fig. 2 the following denotations are given: $\vec{q}^*$ is the desired value of the generalized coordinates vector, obtained by solving inverse kinematics, $\vec{e}$ is a control error, and $\dot{\vec{e}}$ is its derivative:

$$\vec{e} = \vec{q}^* - \vec{q}, \qquad \dot{\vec{e}} = \dot{\vec{q}}^* - \dot{\vec{q}} \tag{6}$$

The work of the controller is given by the next equation:

$$\vec{M} = \mathbf{B}^{-1}\mathbf{A}\left(\mathbf{K}_p\vec{e} + \mathbf{K}_d\dot{\vec{e}}\right) \tag{7}$$

where $\mathbf{K}_p$, $\mathbf{K}_d$ are diagonal gain matrices with constant elements k_i. Controllers of this type are discussed in, for example, work [21], where it is used in control system of a lower limb exoskeleton.

4. Numerical simulation

We consider the case when the platform the exoskeleton is standing on rapidly changes its velocity during a short period of time. In particular we assume that the velocity of the platform changed instantaneously, because of which each link of the exoskeleton gained a non-zero velocity relative to the supporting surface (the platform).

In fig. 3 and 4 the motion of the exoskeleton that uses the described algorithm for reclaiming vertical balance is shown.

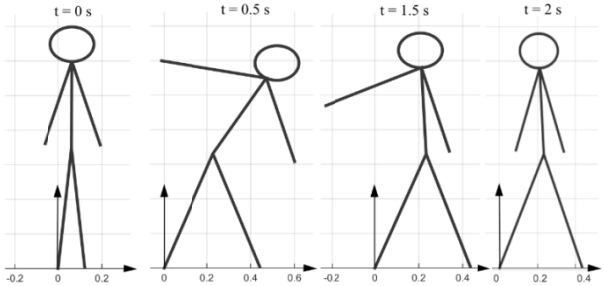


Figure 3 –Configurations of the exoskeleton during vertical balance recovery for the case when the motion lasted for 2 seconds

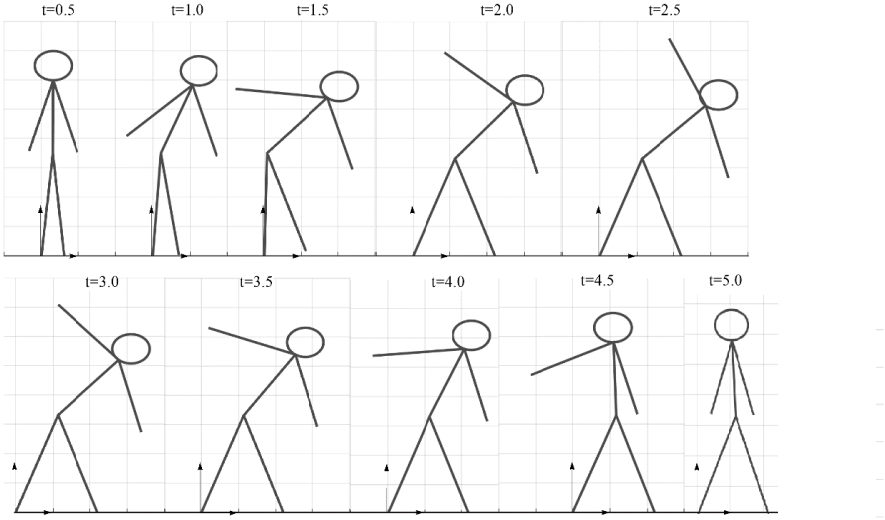


Figure 4 – Configurations of the exoskeleton during vertical balance recovery for the case when the motion lasted for 5 seconds

We can see that during the first stage of the motion the torso leans to the right, which allows the center of mass to move without changing its velocity while the exoskeleton performs a single step. After the exoskeleton has made one step it starts to regain its vertical balance, which results in the torso assuming a vertical orientation. After the end of the motion the center of mass is located above the center of the support polygon.

In fig. 5 time functions of the generalized coordinates are shown. The center of mass of the exoskeleton is moving to the right with the speed of 0.5 m/s relative to the supporting surface.

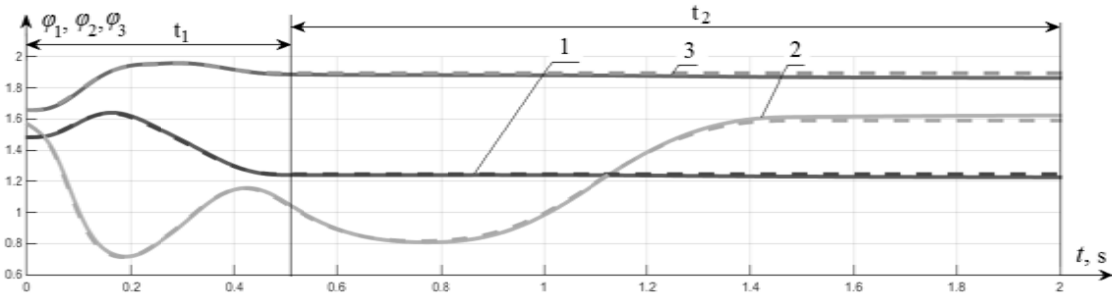


Figure 5 – Time functions of the generalized coordinates:
$1 - \varphi_1$, $2 - \varphi_2$, $3 - \varphi_3$; the dashed lines are showing the graphs of the desired values of those coordinates, the solid lines are the graphs obtained from simulation

The graphs presented in the fig. 5 show that the control system can move the mechanism along the desired trajectory with high accuracy. We should note that at the second stage of the motion the legs of the mechanism remain motionless.

Conclusions

In this paper a model of an exoskeleton moving in the frontal plane was given The model allows us to simulate the motion of the exoskeleton during recovery of the vertical balance. A two stage algorithm for recovery of the vertical balance was discussed. The algorithm allows the exoskeleton to reclaim the vertical balance after its links acquired a velocity relative to the supporting surface, by taking one step. A control system structure is shown, a numerical simulation was carried out. The results of the simulation showed that the algorithm can be used in assistive exoskeletons.

The work is supported by RSF, Project № 14-39-00008

1. D. Miranda-Linares, G. Alrezage, and M. O. Tokhi. Control of lower limb exoskeleton for elderly assistance on basic mobility tasks. In System Theory, Control and Computing (ICSTCC), 2015 19th International Conference on. pp. 441-446.(October 2015).
2. L. O'Sullivan, V. Power, G. Virk, N. Masud, U. Haider, S. Christensen, S. Bai, L. Cuypers, M. D'Havé, and K. Vonck. End user needs elicitation for a full-body exoskeleton to assist the elderly. Procedia Manufacturing, 3, pp.1403-1409.(2015).
3. Díaz, I., Gil, J.J. and Sánchez, E., Lower-limb robotic rehabilitation: literature review and challenges. Journal of Robotics, 2011.
4. Low, K.H., Liu, X., Goh, C.H. and Yu, H. Locomotive control of a wearable lower exoskeleton for walking enhancement. Journal of Vibration and Control, 12(12), pp.1311-1336 (2006).
5. Barbareschi, G., Richards, R., Thornton, M., Carlson, T. and Holloway, C. Statically vs dynamically balanced gait: Analysis of a robotic exoskeleton compared with a human. In Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 2015 37th Annual International Conference of the IEEE (pp. 6728-6731). IEEE (2015, August).
6. Anam, Khairul, and Adel Ali Al-Jumaily. "Active exoskeleton control systems: State of the art." Procedia Engineering 41: 988-994 (2012).
7. Jatsun, S., Savin, S., Lushnikov, B. and Yatsun, A., 2016, January. Algorithm for motion control of an exoskeleton during verticalization. In ITM Web of Conferences (Vol. 6). EDP Sciences.

8. Jatsun S, Savin S, Yatsun A, Malchikov A. Study of Controlled Motion of Exoskeleton Moving from Sitting to Standing Position. Advances in Intelligent Systems and Computing. 2015. T. 371 (pp. 165-172). Springer International Publishing.
9. Jatsun S, Savin S, Yatsun A, Turlapov R. Adaptive control system for exoskeleton performing sit-to-stand motion. In Mechatronics and its Applications (ISMA), 10th International Symposium on 2015 Dec 8 (pp. 1-6). IEEE (2015).
10. Jatsun, S., Savin, S., Lushnikov, B. and Yatsun, A., 2016, January. System analysis of sagittal plane human motion wearing an exoskeleton using marker technology. In ITM Web of Conferences (Vol. 6). EDP Sciences.
11. Jatsun S. F., Vorochaeva L. Yu., Yatsun A. S., Savin S. I.. The modelling of the standing-up process of the anthropomorphic mechanism. Proceedings of the International Conference on CLAWAR. pp. 175-182 (2015).
12. Vukobratović, M. and Borovac, B. Zero-moment point—thirty five years of its life. International Journal of Humanoid Robotics, 1(01), pp.157-173 (2004).
13. Mitobe, K., Capi, G. and Nasu, Y. Control of walking robots based on manipulation of the zero moment point. Robotica, 18(06), pp.651-657 (2000).
14. Choi, Y., You, B.J. and Oh, S.R. On the stability of indirect ZMP controller for biped robot systems. In Intelligent Robots and Systems, 2004.(IROS 2004). Proceedings. 2004 IEEE/RSJ International Conference on (Vol. 2, pp. 1966-1971). IEEE (2004, June).
15. Pratt, J., Carff, J., Drakunov, S. and Goswami, A., 2006, December. Capture point: A step toward humanoid push recovery. In Humanoid Robots, 2006 6th IEEE-RAS International Conference on (pp. 200-207). IEEE.
16. Stephens, B., 2007, November. Humanoid push recovery. In Humanoid Robots, 2007 7th IEEE-RAS International Conference on (pp. 589-595). IEEE.
17. Stephens, B.J. and Atkeson, C.G., 2010, December. Push recovery by stepping for humanoid robots with force controlled joints. In Humanoid Robots (Humanoids), 2010 10th IEEE-RAS International Conference on (pp. 52-59). IEEE.
18. Rebula, J., Canas, F., Pratt, J. and Goswami, A., 2007, November. Learning capture points for humanoid push recovery. In Humanoid Robots, 2007 7th IEEE-RAS International Conference on (pp. 65-72). IEEE.
19. Yun, S.K. and Goswami, A., 2011, September. Momentum-based reactive stepping controller on level and non-level ground for humanoid robot push recovery. In Intelligent Robots and Systems (IROS), 2011 IEEE/RSJ International Conference on (pp. 3943-3950). IEEE.
20. Jatsun S., Savin S., Yatsun A. Motion control algorithm for exoskeleton push recovery in the frontal plane advances in robot design and intelligent control - Proceedings of the 25th International Conference on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region (in publishing).
21. Jatsun S., Savin S., Yatsun A. Parameter Optimization for Exoskeleton Control System Using Sobol Sequences Proceedings of 21st CISM-IFToMM Symposium on Robot Design 2016.

С.Ф. Яцун,С.И.Савин, А.С. Яцун, А.В. Мальчиков

ИЗУЧЕНИЕ УПРАВЛЯЕМОГО ДВИЖЕНИЯ ЭКЗОСКЕЛЕТА ВО ФРОНТАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ В РЕЖИМЕ ВОССТАНОВЛЕНИЯ РАВНОВЕСИЯ

Юго-западный государственный университет, г. Курск
teormeh@inbox.ru, savin@swsu.ru, ayatsun@ya.ru, zveroknnp@gmail.com

Аннотация

В статье рассматривается экзоскелет, предназначенный для людей с нарушениями функций опорно-двигательного аппарата. Приведена математическая модель экзоскелета для случая движения во фронтальной плоскости. В работе изучен вопрос восстановления вертикальной устойчивости экзоскелет для случая, когда экзоскелет стоит на подвижной платформе с быстро изменяющейся скоростью. Предложен алгоритм восстановления равновесия после толчка, требующий выполнения одного шага. Произведены численные эксперименты и дан их краткий анализ. Результаты моделирования показали работоспособность алгоритма.

Ключевые слова: экзоскелет, алгоритм восстановления равновесия, система управления, математическое моделирование.

Введение

В настоящее время экзоскелеты находят применение в медицине, реабилитации, промышленности для решений военных задач. Такого рода механизмы могут быть использованы для расширения функциональных возможностей человека, в том числе для восстановления способности самостоятельно ходить для людей с ограниченными возможностями, и пожилых людей [1-3]. При этом распространение экзоскелетов вызывает необходимость обеспечить более высокое качество работы таких аппаратов, повысить безопасность их использования. Это, в свою очередь, обуславливает необходимость изучения различных режимов управляемого движения экзоскелетов, создания инструментов проектирования этих устройств.

Имеется ряд публикаций, посвященных системам управления экзоскелетов, где рассматриваются такие вопросы, как устойчивость ходьбы [3-6] и вставание [7-11]. Одним из основных подходов заключается в использовании управления точкой ZMP (zero moment point), что позволяет экзоскелету сохранить вертикальное равновесие во время движения [12-14]. При этом недостаточно изучен вопрос сохранения вертикального равновесия экзоскелета после толчка – кратковременного внешнего возмущения. При этом, в научной литературе, посвященной двуногой ходьбе, можно найти ряд методик управления устройствами в указанном режиме [15-19].

Можно выделить два случая восстановления после внешнего возмущающего воздействия. В первом случае сила действует на механизм в течении короткого периода времени. Этот случай представляет собой ситуацию, когда пользователь экзоскелета сталкивается с другим движущимся объектом. Во втором случае экзоскелет стоит на платформе, которая быстро приобретает скорость в течение короткого периода времени, что может произойти при езде на общественном транспорте. Здесь будем рассматривать второй случай.

1. Математическая модель

Рассмотрим ассистивный экзоскелет, включающий пару рук и ног, присоединённых к корпусу. Будем рассматривать случай, когда экзоскелет стоит на выпрямленных ногах, причем хотя бы одна нога остается неподвижной на опорной поверхности. Также будем считать, что руки пациента в экзоскелете могут двигаться только в плечевых суставах. Эти допущения позволяют моделировать обе ноги и руки как единые звенья, движущиеся во фронтальной плоскости. На рис. 1 представлена схема механизма.

На рис. 1 точки O_i - шарниры, оснащенные приводами, которые создают моменты M_i, C_i - центры тяжести звеньев, φ_i - абсолютные углы, определяющие ориентацию звеньев относительно горизонтали. Звенья имеют массы m_i.

В случае, когда точка O_1 остается неподвижной можно ввести вектор обобщенных координат:

$$\vec{q} = [\varphi_1 \quad \varphi_2 \quad \varphi_3 \quad \varphi_4 \quad \varphi_5]^{\mathrm{T}}. \qquad (1)$$

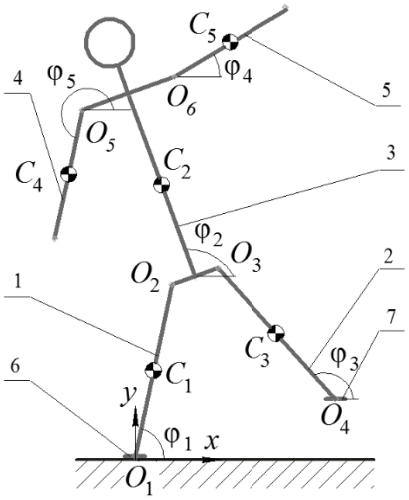


Рисунок 1 –Схема экзоскелета; 1-7 – первые – седьмые звенья экзоскелета

Уравнения динамики механизм можно записать в векторной форме:

$$\mathbf{A}(\vec{q})\ddot{\vec{q}} + \vec{C}(\vec{q},\dot{\vec{q}}) + \vec{G}(\vec{q}) + \vec{\Phi}(\vec{q}) = \mathbf{B}\vec{M} \qquad (2)$$

где $\vec{C}(\vec{q},\dot{\vec{q}})$ - вектор обобщенных сил инерции, $\mathbf{A}(\vec{q})$ - обобщенная матрица инерции, $\vec{G}(\vec{q})$ - вектор обобщенных гравитационных сил, $\vec{\Phi}(\vec{q})$ - вектор обобщенных диссипативных сил, $\mathbf{B}$ - матрица, связывающая крутящие моменты двигателей с созданными им обобщенными силами, $\vec{M} = [M_1 \quad M_2 \quad M_3 \quad M_4 \quad M_5]^{\mathrm{T}}$.

Данное векторное уравнение динамики можно использовать для моделирования движения робота. Мы будем рассматривать случай, когда моменты $\vec{M}$ генерируются системой управления по ошибке.

2. Стратегия восстановления вертикальной устойчивости

В этой статье рассматривается двухэтапный алгоритм работы системы управления, предложенный в работе [20], позволяющий восстанавливать равновесие после толчка. Первый этап, начинается, после того, как центр масс экзоскелета получает ненулевую скорость. Этап длится t_1 секунд. На этом этапе точка O_4 отрывается от опорной поверхности и экзоскелет отклоняется в

сторону. В начале первого этапа система управления оценивает как далеко переместится центр масс на протяжении этапа. Используя данную информацию, алгоритм управления положением стопы определяет желаемые координаты точки O_4 к концу этапа, и траекторию по которой точка O_4 должна двигаться.

Второй этап движения, который длится t_2 секунды, начинается, когда точка O_4 обретает контакт с опорной поверхностью. На данном этапе система управления замедляет центр масс вплоть до его остановки, а затем перемещает его к середине опорного полигона. Точка O_4 остается неподвижной все время на протяжении данного этапа.

Таким образом, система управления генерирует желаемые траектории для двух векторов: $\vec{r}_{O\,4}$ и $\vec{r}_C$. Желаемая траектория $\vec{r}_C^{\,*} = [x_C^* \quad y_C^*]^{\mathrm{T}}$ для центра масс определяется по следующим формулам:

$$x_{\tilde{N}}^* = \begin{cases} x_C(0) + \dot{x}_C(0)\cdot t \quad if \quad t \le t_1 \\ \sum_{p=0}^{5}\left(c_{1,p}\cdot t^p\right) \quad if \quad t > t_1 \end{cases}, \; y_{\tilde{N}}^* = \begin{cases} y_C(0) + \dot{y}_C(0)\cdot t \quad if \quad t \le t_1 \\ \sum_{p=0}^{5}\left(c_{2,p}\cdot t^p\right) \quad if \quad t > t_1 \end{cases} \tag{3}$$

где $x_C(0), y_C(0)$ обозначают положение центра масс в момент толчка, $\dot{x}_C(0), \dot{y}_C(0)$ - его скорость в результате толчка, $c_{1,p}$ и $c_{2,p}$ - полиномиальные коэффициенты.

Желаемая траектория $\vec{r}_{O4}^{\,*} = [x_{O4}^* \quad y_{O4}^*]^{\mathrm{T}}$ для точки O_4 определяется по следующим формулам:

$$x_{O4}^* = \begin{cases} \sum_{p=0}^{5}\left(c_{3,p}\cdot t^p\right) \quad if \quad t \le t_1 \\ x_s \quad if \quad t > t_1 \end{cases}, \; y_{O4}^* = \begin{cases} \sum_{p=0}^{5}\left(c_{4,p}\cdot t^p\right) \quad if \quad t \le t_1 \\ 0 \quad if \quad t > t_1 \end{cases} \tag{4}$$

где $c_{3,p}$ и $c_{4,p}$ - полиномиальные коэффициенты, x_s - желаемое конечное положение ноги, которое определяется по формуле:

$$x_s = x_C(0) + \mu\dot{x}_C(0)t_1 \tag{5}$$

где $\mu > 1$ - коэффициент запаса. Выбор желаемого конечного положения ноги обусловливается требованием нахождения центра масс внутри полигона управления на втором этапе движения. Чем больше коэффициент запаса, тем дальше от границы опорного полигона оказывается центр масс. Коэффициенты $c_{3,p}$ и $c_{4,p}$ выбираются таким образом, чтобы точка O_4 имела нулевую скорость и нулевое ускорение в начале и конце движения. Подробнее работа алгоритма рассмотрена в [20].

3. Разработка системы управления

Управление движением экзоскелета осуществляется с помощью пропорционально-дифференциального регулятора с адаптивными параметрами. Структурная схема системы управления представлена на рис. 2.

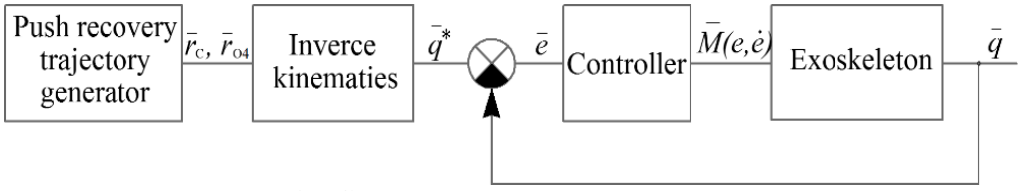


Рисунок 2 – Структурная схема системы управления

На рис. 2 приняты следующие обозначения: $\vec{q}^{\,*}$ - желаемое значение вектора обобщенных координат, полученные решением обратной задачи кинематики, $\vec{e}$ вектор ошибки управления и $\dot{\vec{e}}$ - его первая производная. :

$$\vec{e} = \vec{q}^{\,*} - \vec{q}, \quad \dot{\vec{e}} = \dot{\vec{q}}^{\,*} - \dot{\vec{q}} \tag{6}$$

Работа регулятора описывается следующим уравнением:

$$\vec{M} = \mathbf{B}^{-1}\mathbf{A}\left(\mathbf{K}_p\vec{e} + \mathbf{K}_d\dot{\vec{e}}\right) \tag{7}$$

где $\mathbf{K}_p$, $\mathbf{K}_d$ диагональные матрицы усиления с постоянными элементами (коэффициентами усиления регулятора) k_i. Данный тип регулятора представлен, например, в работе [21], где он применяется для управления экзоскелетом нижних конечностей.

4. Численное моделирование

Рассмотрим случай, когда экзоскелет восстанавливает равновесие после того, как платформа, на которой он стоит, быстро изменила свою скорость в течении короткого промежутка времени. Будем рассматривать частный случай, когда скорость изменяется мгновенно, в результате чего каждое звено экзоскелета приобретает ненулевые скорости относительно опорной поверхности.

На рис. 3 и 4 показано движение экзоскелета при восстановлении равновесия после толчка с помощью предложенного в разделе 2 алгоритма.

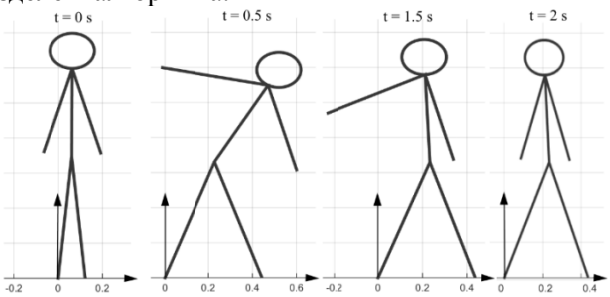


Рисунок 3 –Конфигурации экзоскелета при восстановлении равновесия для случая, когда движение длилось 2 секунды

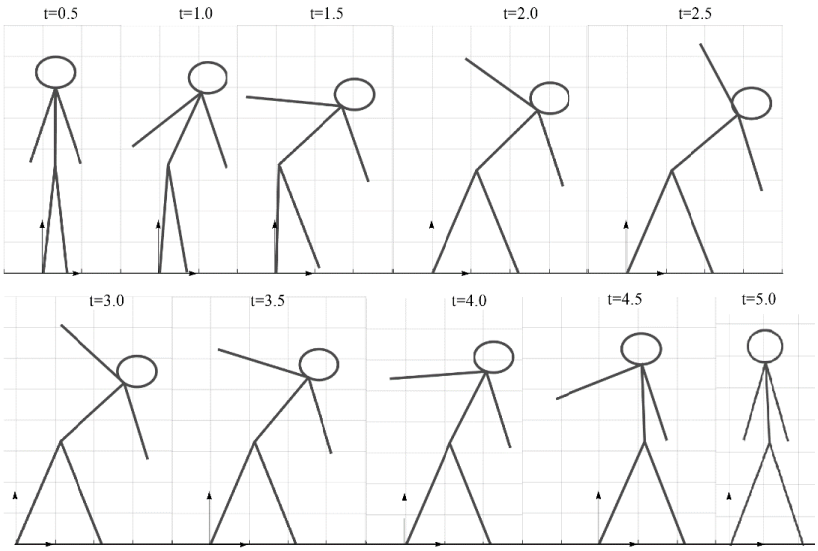


Рисунок 4 – Конфигурации экзоскелета при восстановлении равновесия для случая, когда движение длилось 5 секунд

Мы видим, что на первом этапе движения туловище наклоняется вправо, что позволяет центру масс двигаться без изменения его скорости, а экзоскелет при этом выполняет шаг. После того, как экзоскелет совершает один шаг, он начинает восстанавливать вертикальное равновесие, в результате чего торс занимает вертикальное положение. В конце движения центра масс находится над центром опорного полигона.

На рис. 5 представлены временные зависимости обобщенных координат. Центр масс экзоскелета движется со скоростью 0,5 м/с вправо относительно земли.

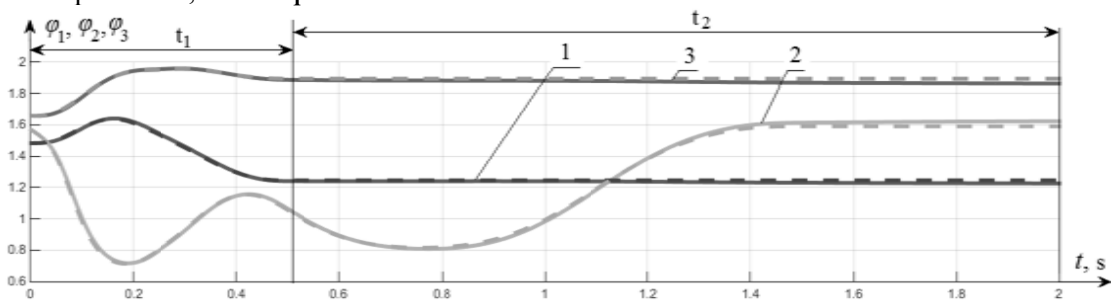


Рисунок 5 – Временные зависимости обобщенных координат:

1 – φ_1 , 2 – φ_2 , 3 – φ_3 ; пунктирные линии обозначают графики для желаемых значений этих углов

Анализ графиков показанных на рис. 5 мы показывает, что система управления способна перемещать механизм вдоль желаемой траектории с высокой точностью. Заметим, что на втором этапе движения ноги механизма остаются неподвижными

Заключение

В статье представлена модель экзоскелета, движущегося во фронтальной плоскости. Данная модель позволяет моделировать движение экзоскелета в процессе восстановления равновесия. Предложен двухэтапный алгоритм восстановления равновесия после толчка, позволяющий экзоскелету восстановить равновесие в случае, когда его звенья резко приобретают скорость относительно опорной поверхности. Показана структура системы управления, которая реализует предложенный алгоритм и проведено математическое моделирование. Результаты моделирования показали, что предложенный алгоритм может быть использован в системе управления ассистивного экзоскелета.

Работа выполнена при поддержке РНФ, Проект № 14-39-0000

1. D. Miranda-Linares, G. Alrezage, and M. O. Tokhi. Control of lower limb exoskeleton for elderly assistance on basic mobility tasks. In System Theory, Control and Computing (ICSTCC), 2015 19th International Conference on. pp. 441-446.(October 2015)
2. L. O'Sullivan, V. Power, G. Virk, N. Masud, U. Haider, S. Christensen, S. Bai, L. Cuypers, M. D'Havé, and K. Vonck. End user needs elicitation for a full-body exoskeleton to assist the elderly. Procedia Manufacturing, 3, pp.1403-1409.(2015)
3. Díaz, I., Gil, J.J. and Sánchez, E., Lower-limb robotic rehabilitation: literature review and challenges. Journal of Robotics, 2011.
4. Low, K.H., Liu, X., Goh, C.H. and Yu, H. Locomotive control of a wearable lower exoskeleton for walking enhancement. Journal of Vibration and Control, 12(12), pp.1311-1336 (2006)
5. Barbareschi, G., Richards, R., Thornton, M., Carlson, T. and Holloway, C. Statically vs dynamically balanced gait: Analysis of a robotic exoskeleton compared with a human. In Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 2015 37th Annual International Conference of the IEEE (pp. 6728-6731). IEEE (2015, August)
6. Anam, Khairul, and Adel Ali Al-Jumaily. "Active exoskeleton control systems: State of the art." Procedia Engineering 41: 988-994 (2012)
7. Jatsun, S., Savin, S., Lushnikov, B. and Yatsun, A., 2016, January. Algorithm for motion control of an exoskeleton during verticalization. In ITM Web of Conferences (Vol. 6). EDP Sciences.
8. Jatsun S, Savin S, Yatsun A, Malchikov A. Study of Controlled Motion of Exoskeleton Moving from Sitting to Standing Position. Advances in Intelligent Systems and Computing. 2015. T. 371 (pp. 165-172). Springer International Publishing
9. Jatsun S, Savin S, Yatsun A, Turlapov R. Adaptive control system for exoskeleton performing sit-to-stand motion. In Mechatronics and its Applications (ISMA), 10th International Symposium on 2015 Dec 8 (pp. 1-6). IEEE (2015)
10. Jatsun, S., Savin, S., Lushnikov, B. and Yatsun, A., 2016, January. System analysis of sagittal plane human motion wearing an exoskeleton using marker technology. In ITM Web of Conferences (Vol. 6). EDP Sciences.
11. Jatsun S. F., Vorochaeva L. Yu., Yatsun A. S., Savin S. I.. The modelling of the standing-up process of the anthropomorphic mechanism. Proceedings of the International Conference on CLAWAR. pp. 175-182 (2015)
12. Vukobratović, M. and Borovac, B. Zero-moment point—thirty five years of its life. International Journal of Humanoid Robotics, 1(01), pp.157-173 (2004)
13. Mitobe, K., Capi, G. and Nasu, Y. Control of walking robots based on manipulation of the zero moment point. Robotica, 18(06), pp.651-657 (2000)
14. Choi, Y., You, B.J. and Oh, S.R. On the stability of indirect ZMP controller for biped robot systems. In Intelligent Robots and Systems, 2004.(IROS 2004). Proceedings. 2004 IEEE/RSJ International Conference on (Vol. 2, pp. 1966-1971). IEEE (2004, June)
15. Pratt, J., Carff, J., Drakunov, S. and Goswami, A., 2006, December. Capture point: A step toward humanoid push recovery. In Humanoid Robots, 2006 6th IEEE-RAS International Conference on (pp. 200-207). IEEE.

16. Stephens, B., 2007, November. Humanoid push recovery. In Humanoid Robots, 2007 7th IEEE-RAS International Conference on (pp. 589-595). IEEE.
17. Stephens, B.J. and Atkeson, C.G., 2010, December. Push recovery by stepping for humanoid robots with force controlled joints. In Humanoid Robots (Humanoids), 2010 10th IEEE-RAS International Conference on (pp. 52-59). IEEE.
18. Rebula, J., Canas, F., Pratt, J. and Goswami, A., 2007, November. Learning capture points for humanoid push recovery. In Humanoid Robots, 2007 7th IEEE-RAS International Conference on (pp. 65-72). IEEE.
19. Yun, S.K. and Goswami, A., 2011, September. Momentum-based reactive stepping controller on level and non-level ground for humanoid robot push recovery. In Intelligent Robots and Systems (IROS), 2011 IEEE/RSJ International Conference on (pp. 3943-3950). IEEE.
20. Jatsun S., Savin S., Yatsun A. Motion control algorithm for exoskeleton push recovery in the frontal plane advances in robot design and intelligent control - Proceedings of the 25th International Conference on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region (in publishing)
21. Jatsun S., Savin S., Yatsun A. Parameter Optimization for Exoskeleton Control System Using Sobol Sequences Proceedings of 21st CISM-IFToMM Symposium on Robot Design 2016

V.P. Andreev, P.F. Pletenev

DEVELOPING INTER-MODULAR COMMUNICATION FOR HETEROGENEOUS MOBILE ROBOT

MSTU «STANKIN», International Laboratory «Sensorika» International Institute of the New Educational Technologies, RSUH, Moscow

andreevvipa@yandex.ru, cpp.create@gmail.com

Abstract

We present a first approximation of the implementation of the "inter-module communication language" in a heterogeneous modular mobile robot on the basis of the functional–modular principle. We describe the hardware and software interfaces of the inter-module communication and the functional use of the network control module.

Keywords: mobile robot, modular robot, control system, local area network, information-measuring and control system

Introduction

This study is a part of research activities on the development of a multi-purpose heterogeneous modular mobile robot (MR). Our conception is that a heterogeneous modular MR is a construct of functionally completed individual mechatronic or electronic devices that, being connected in one of a finite number of configurations, constitute a synergistic system; i.e., a mobile robot with execution, tactical, and strategic control levels.

At present, many countries are engaged in the development of modular robotic systems. A review of studies in this field can be found in [1, 2]. However, these studies are rather laboratory experiments on the miniaturization and unification of robotic modules to create complex homogeneous or heterogeneous robots capable of changing their structure and purpose during the operation. They can be most conveniently used for experiments on the creation of different types of group and swarm control [3–5]. The purpose of our study is to develop a hardware and software system for a heterogeneous modular mobile robot that, on the one hand, would consist of unified blocks and, on the other hand, be capable of doing actions that are useful both scientifically and practically.

The functional–modular principle of MR construction was formulated in [1]:

1. Each module is a functionally completed electronic or mechatronic device.
2. The information-measuring and control system (IMCS) of the robot is a local area network the nodes of which are modules.
3. The IMCS of the robot implements the principle of distributed control.
4. Each module is supplied with respective software—a driver allowing the module to be included in the network structure of the robot IMCS without refactoring its low-level code.

The principle of the functional–modular design of MR makes it possible to construct a distributed control system. In such a system, the control processes are most independent of each other and distributed between computers of the modules and the processes communicate through the mechanism of reconfiguration and interaction of control systems (briefly, "communication language" for modules). This mechanism makes it possible

to create a control system (CS) that is common for the whole robot but is distributed mechanically and in terms of information. Among the robots described in review [1], there are none where the inter-module communication environment could transmit instructions of the tactical or strategic control levels. However, the principle of the functional–modular design of MRs and the definition above-mentioned definition of a modular MR imply that these instructions and data are mainly transmitted. Supposedly, the modules implement the tactical control level partially or fully, and there are one or more modules that act as a strategic level CS. Therefore, the aim of this study is to develop a "communication language" for modules, corresponding to the functional–modular design MRs.

To reach this aim, it is necessary to:

1. Choose the type and topology of the communication network and the method of interaction of modules,
2. Elaborate requirements for hardware and software modules,
3. Define the system of module control instructions.

Choice of topology

Modular robots of different manufacturers use different interface standards for the communication between individual modules. A "bus" type topology with local branching is being used most often for the communication in these robots. The THOR [4] and SMART [5] heterogeneous robots use RS-485 and CAN buses, respectively. These specialized buses provide a determined message delivery time at the standard level. This is necessary for the stable operation of the execution level control system but is redundant for the transmission of instructions of higher control levels. A distributed control system requires the use of most standard, well-proven and widespread interaction interfaces. Currently, many companies turn to the Ethernet standard, which (with modifications and supplements) has become a new standard for industrial networks due to its versatility [6, 7]. This standard is used in the territorially distributed system of control over a group of mobile robots through the Internet [8]. Ethernet has not been a bus inherently: it uses a connection of "one-to-one" type. Ethernet can be modified by adding switches to the network nodes to provide a connection (topology) of "one-to-many" type. Thus, there are two topology variants of the Ethernet topology: "bus" and "star". The choice of topology depends on the requirements to the desired message exchange rate, assembly and economic indicators, and the operational limitations on the network of a given topology. For example, the use of the "bus" type topology is limited by the peak number of switches on the "one to one" connection path (no more than 4 to minimize collisions). In terms of the degree of sophistication of the network software [8], we choose a "star" type topology to implement the distributed control and minimize the costs.

Methods of interaction in a modular mobile robot

We use the "concept of drivers" [8] as a basis for the development of the "communication language" for modules. This concept implies that for each mechatronic device (each module of the MR) one should create a unified network control protocol on the basis of currently available low-level interaction interfaces. Then, one can relatively easily to integrate the IMCS of the module into the IMCS of the robot with the help of only additional driver that implements the protocol-determined program instructions of control and the protocols of network interaction. The "concept of drivers" assumes that the least control object is any electronic or mechatronic device that is part of the control object. In our case, this is the module of MR. Then, the IMCS of the modular MR is constructed as a local area network the nodes which are IMCS of modules. To implement this concept, we have developed a finite set of program control instructions and network protocols for the creation of an application programming interface [9]. Hereafter, we call this software a library of the Internet laboratory (zmq_robot). This software constructed from the ZMQ library [10] and makes it possible to create both "drivers" and control programs.

Each driver is an object of the zmq_robot.RoboWorker class. Because the object created is unnamed, a name should be assigned to be detected by other participants of the network exchange. Each driver keeps the history of arriving values: the data loopback (by default, the last 100 values). The data transmission to zmq_robot is performed by converting them into the JSON format [11]. This means that the data structure should consist of the following data types: list, dictionary, number, and string. The keys for dictionaries must be strings, and the dictionaries and lists can store arbitrary variables. The objects of the zmq_robot.RoboWorker class are called the network submodule (SM). Each submodule can be either input or output. The input submodule merely receives data (instructions) from external systems and transmits these instructions to the module control system, and the output submodule receives indications from one of the module sensors, generating a data loopback, and sends its requested portions to the requesting system. The first object zmq_robot.RoboWorker created by the computer of the module runs a name-server (the

zmq_robot.NameServer class) on it. This server aims to record the appearance and removal of zmq_robot.RoboWorker objects on the computer upon request.

The interaction with modules that cannot create a full-fledged network interface on the basis of zmq_robot requires an interface similar to zmq_robot, but on the basis of HTTP-requests or using the technology of web-sockets. A comparison between the messaging systems based on the ZMQ library and the standard sockets library was conducted in [12]. It was shown that when the data transmission environment is unstable (there are short-term breaks or delays) and the data transmission occurs periodically at a peak rate, the system built on the ZMQ library is superior. However, if the environment is more deterministic with lower requirements for the rate of messaging, such as the environment of the modular MR, one can also use the technology of HTTP-requests or web sockets. The data structure and dimensions as well as the number of tasks of individual submodules and their specification methods are not regulated by the zmq_robot library. Therefore, in the case of a modular MR with a distributed control system, it is necessary to create a standardized interface.

Requirements for module software and data transmission standardization

1. In terms of network control, the software of each module should consist of:
   - one or more functional network submodules;
   - a name-server;
   - service network submodules that implement a common program interface for the module.
2. Each module must have a unique IP address (assigned from a set of addresses) that is unique to each module of the mobile robot.

   The common programming interface (CPI) of the module involves the following submodules:
   - an output submodule with a formal description of functional submodules;
   - aninputsubmodulethatreceivesthesignaloflegalpowerbreakinthemodule (thepowerbreakislegalifitdoesnotaffectthelogicofthefileandnetworksystems);
   - an input submodule that receives the actual list of modules and creates messages on connected or removed modules for all submodules;
   - an input submodule that receives information about errors in the MR.

These service submodules need to be implemented as a library of classes for use in each module. We illustrate the above suggestions on the example shown in Fig. 1. In a minimum configuration, the robot consists of a battery module (BM), a motion module (MM), a sensor module (SM), and a network control module (NCM) [2]. EachofthesemoduleshasauniqueIP-address.

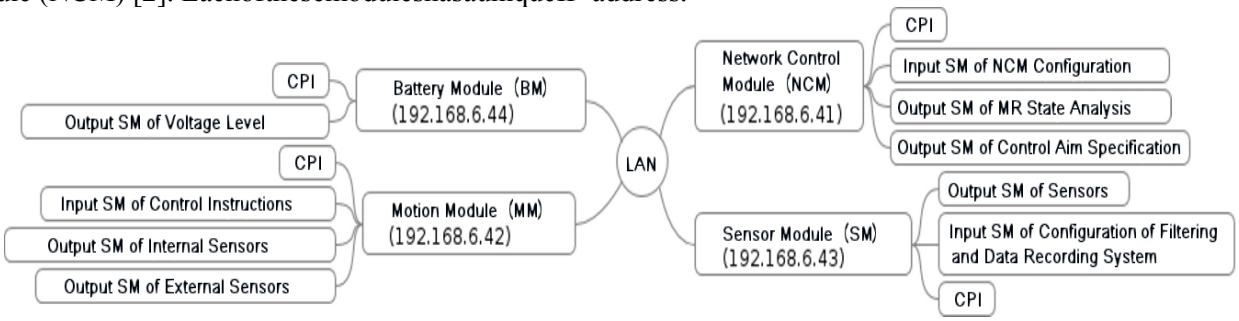


Figure 1 – Network structure of the modular mobile robot with a minimal configuration *(common program interface (CPI), submodule (SM))*

The service output submodule of formal description provides information about all functional submodules as a list of dictionaries. Each dictionary contains structured data on the submodule capabilities. These data involve the follow ing fields: name of submodule (for example, “internal sensors”), type of submodule (input or output), module port that is fixed to a given submodule, and, in the case of an output submodule, a list of variables measured by the sensors belonging to the submodule (with dimensions). The data received from the motion module through the service output submodule of formal description may be of the following form (JSON code):

```
[{"name":"internal_sensors", "type":"output", "port":5502,
  "measured_variables":[
   {"name":"odometry_sensor_left ", "dimension":"m"},
   {"name":"odometry_sensor_right", "dimension":"m"},
   {"name":"current_sensor_left", "dimension":"A"},
   {"name":" current_sensor_right", "dimension":"A"}]},
 {"name":"external_sensors", "type":"input",.....}]
```

The service input submodule of the actual list of modules receives the lists of connected modules from the external system. This submodule creates events for the remaining submodules on the connection and disconnection of other modules. Here, the other submodules can reconstruct the logic of its operation when these modules appear.

The submodule of error message is used to prevent various damages to the robot. The module can be in two states: operating and error. The transition from one state to another occurs when messages are received from external or internal systems. Each message can either set or reset the error state in the module and has a priority of 1 to 100. In line with the rules, the submodule of error messages estimates the priority of each message and changes accordingly the state of the module, thus changing the logic of its operation.

The data structure received from output functional submodules must be a list of two variants for the representation of the values of each variable declared in the submodule of formal description. The first variant implies a variable converted to the dimension declared in the submodule of formal description, and the second variant implies an original measured value. If the dimensional variable is received with filtering (for example, averaging), the second variable is a list of all values used for filtering. In the example presented below, the data lists received from the output functional submodule of internal sensors of the motion module described in the previous examples (the specific values are given only as an example):

[[12,1230], [-12,-1230],

[0.51, [512, 498, 512, 480]],[0.52, [500, 485, 514, 472]]]

The first two lists involve the values received from odometry sensors. These lists were calculated using a simple multiplication of the measured value by a factor to reduce to a correct dimension. The next two lists involve the values received from force multiplier's current sensors. Their treatment is more difficult because of averaging with respect to several measured values

Requirements to the hardware and software implementation of the control system

The hardware and software requirements for implementing the module are based on the driver implementation requirements described in [12]. The hardware and software supply of the module control system must have:

(1) a computing device capable of operating in the Ethernet network,
(2) the capability to implement all the necessary interaction protocols,
(3) a sufficient capacity to implement the module functionality,
(4) minimum weight and size,
(5) the lowest possible cost.

Our hardware and software system is proposed to consist of microcontrollers and microcomputers of different manufacturers. As noted earlier, the modules of the hardware and software system are used to generate a distributed system of control over the robot as a whole. This control system can have better performance in comparison with traditional control systems built on a single computer. In terms of the above-mentioned requirements, the most useful devices are the Arduino Yun, Raspberry Pi, and other microcomputers described in [8]. For the communication methods that are implemented on the basis of HTTP-requests or web-sockets, one can also use less expensive solutions consisting of Arduino Mega and Ethernet board.

The system of control instructions

Each module should have an instruction system that governs the module behavior. An instruction is a structured set of data on the desired behavior of the module and is a list of two elements: name and list of parameters. The system of instructions of each input submodule must be documented in a service submodule of formal description in the field of submodule dictionary as a list of dictionaries, each of which contains the name of instruction, the instruction description in the natural language, and a list of parameters consisting of dictionaries with the parameter name, dimension, type, and description in the natural language. The system of instructions for each module is corrected during their creation; however, even now we can formulate (in the first approximation) the set of instructions for the motion module (the input submodule "desired position"):

1. "*Relative_movement*". This instruction shifts the module on a plane from the current point in a coordinate system that is associated with the module. In this coordinate system, the positive direction of the ***y***-axis corresponds to the forward motion, the positive direction of the ***x***-axis corresponds to the rightward motion; the negative direction corresponds to the backward and leftward directions, respectively. If the shift is impossible, the module goes into the state of error. The parameters (real numbers) are: "***x***" and "***y***" are the shifts along the axes in meters, "***theta***" is the change in the module orientation in radians, and "***dt***" is the motion length in seconds.
2. "*Set_origin*". If this instruction goes without parameters, the absolute coordinate system of the module is

aligned with the coordinate system that is associated with the module. Otherwise, the origin of the absolute coordinate system is shifted to a point with given coordinates and orientation. The parameters (real numbers) are: "***x***" and "***y***" are the desired coordinates in meters and "***theta***" is the rotation of the coordinate system in radians.

3. "*Absolute_movement*". This instruction shifts the module on a plane from the current point in a coordinate system that is associated with the module. In this coordinate system, the positive direction of the ***y***-axis corresponds to the forward motion, the positive direction of the ***x***-axis corresponds to the rightward motion; the negative direction corresponds to the backward and leftward directions, respectively. If the shift is impossible, the module goes into the state of error. The parameters (real numbers) are: "***x***" and "***y***" are the shifts along the axes in meters, "***theta***" is the change in the module orientation in radians, and "***dt***" is the motion length in seconds.

Requirements for the Network Control Module

The most important thing in the construction of the inter-module interaction is the network control module (NCM). This module aims to distribute the control instructions and data between the MR modules. This module is responsible for the search and registration of new modules in the network, the implementation of a part of the tactical and strategic control levels, and the legal power break in modules. The NCM interacts with both services and functional submodules.

The NCM periodically queries each IP-address of the set to check whether there is a name-server at this address. If a name-server is found, its content is added to the general table of connected modules and submodules, the service submodule of formal description is queried, and, on that basis, the data on detected modules is updated. If the name-server is not found but has been previously present in the list of modules, this module is taken to be removed. The changed information about modules is transmitted to all modules and service submodules with the actual list of modules.

At a rate of operation of the tactical and strategic levels of the control system, the NCM simultaneously queries all output submodules of all modules, requesting their entire data loopback, starting with the time of the last query cycle. Then, all loopbacks are processed by the control system, and the MCN sends new control instructions to all input submodules of all modules.

Conclusions

Some types and topologies of inter-module communication have been considered. The Ethernet network protocol is offered as the environment. The language of inter-module communication is assumed to be based on the concept of "drivers". In future, we plan to consider different methods for the representation of data about the surrounding world as well as methods of aggregation of data obtained from sensors of different nature to adjust the system of instructions of different modules. Also, we plan to combine the functions of name-server and internal submodule with the formal description of functional submodules.

This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, project no. 16-07-00811a.

1. Andreev V.P., and Poduraev Yu.V., Functional–Modular Design of Heterogeneous Mobile Robotic Systems, In Proceedings of the International Scientific and Technical Conference "Extreme Robotics". – St. Petersburg, 2016 (the present book).
2. Andreev V.P., and Kim V.L., Development of Functional Units of a Heterogeneous Modular Mobile Robot, In Proceedings of the International Scientific and Technical Conference "Extreme Robotics". – St. Petersburg, 2016 (the present book).
3. Kohji Tomita, Satoshi Murata, Eiichi Yoshida, Haruhisa Kurokawa, Akiya Kamimura and Shigeru Kokaji, Development of a Self-Reconfigurable Modular Robotic System, Sensor Fusion and Decentralized Control in Robotic Systems III, Proceedings of SPIE, Vol. 4196, pp. 469-476, 2000.
4. Lyder A.H., Stoy K., Mendoza-Garcia R.-F., Larsen J.C., and Hermansen P., On sub-modularization and morphological heterogeneity in modular robotics, Intelligent Autonomous Systems 12, volume 193 of Advances in Intelligent Systems and Computing, pp. 649-661. Springer Berlin Heidelberg, 2013.
5. J. Baca, M. Ferre, and R. Aracil, A heterogeneous modular robotic design for fast response to a diversity of tasks, Robotics and Autonomous Systems, vol. 60, no. 4, pp. 522–531, 2012.
6. Brendan Galloway, Gerhard P. Hancke. Introduction to Industrial Control Networks, URL: http://foresight.ifmo.ru/ict/shared/files/201311/1_135.pdf.
7. EtherCAT Technology Group, Industrial Ethernet Technologies, URL: https://www.ethercat.org/download/documents/Industrial_Ethernet_Technologies.pdf.
8. Victor Andreev, Kirill Kirsanov, Valentin Pryanichnikov, Geographically distributed "multi-operator" Control for Mechatronic Devices via the Internet, 26th DAAAM Int. Symp. on Intelligent Manufacturing and Automation, 2015. Elsevier. Procedia Engineering (2016) ISSN 1877-7058, 2016.

9. Kirsanov K., Software architecture of control system for heterogeneous group of mobile robots, 25th DAAAM Int. Symp. on Intelligent Manufacturing and Automation, 2014. Procedia Engineering (2015) ISSN 1877-7058, 2015. – V.100. – P.216 – 221.
10. Hintjens, Pieter. "0MQ - The Guide." 2011. http://zguide.zeromq.org/page:all.
11. ECMA-404 1st Edition / October 2013 The JSON Data Interchange Format, URL:http://www.ecma-international.org/publications/files/ECMA-ST/ECMA-404.pdf.
12. Andreev V.P., Kirsanov K.B., Technology of multi-operator control over mobile robots through the Internet, Izv. Yuzhn. Feder. Univ.: Tech. Nauki, No. 10(171), Taganrog, 2015, pp. 6–18.

В.П. Андреев, П.Ф. Плетенев

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ МЕЖМОДУЛЬНОГО ОБЩЕНИЯ В ГЕТЕРОГЕННОМ МОДУЛЬНОМ МОБИЛЬНОМ РОБОТЕ

МГТУ «СТАНКИН», МЛ «Сенсорика», МИНОТ РГГУ, Москва
andreevvipa@yandex.ru, cpp.create@gmail.com

Аннотация

Представлено первое приближение к реализации «языка межмодульного общения» в гетерогенном модульном мобильном роботе. В основу положен функционально-модульный принцип. Описаны аппаратный и программный интерфейсы межмодульного общения, функциональное назначение модуля сетевого управления.

Ключевые слова: мобильный робот, модульный робот, система управления, локальная вычислительная сеть, информационно-измерительная и управляющая система.

Введение

Настоящая работа является частью научно-исследовательской работы по созданию гетерогенного модульного мобильного робота (МР) широкого назначения. В нашем понимании гетерогенный модульный МР — это конструкция из отдельных функционально законченных мехатронных или электронных устройств, которые, будучи соединены в одну из конечного числа конфигураций, составляют синергетическую систему — мобильный робот с исполнительным, тактическим и стратегическим уровнями управления.

В настоящее время во многих странах ведутся разработки модульных робототехнических систем. Некоторый обзор работ в данном направлении приведён в [1, 2]. Однако рассмотренные роботы — это, скорее, лабораторные эксперименты по миниатюризации и унификации модулей роботов для создания сложных гомогенных и гетерогенных роботов, которые в ходе работы могут менять свою структуру и назначение. Их очень удобно использовать для экспериментов по созданию различных видов группового и роевого управления, чему посвящены, в основном, работы [3-5]. Настоящая работа посвящена созданию такого аппаратно-программного обеспечения для гетерогенного модульного мобильного робота, который, с одной стороны, состоял бы из унифицированных блоков, а, с другой, мог бы выполнять действия, полезные не только и не столько в научном, но и в практическом смысле.

В работе [1] сформулирован функционально-модульный принцип построения МР:

1. Каждый *модуль* является функционально завершённым электронным или мехатронным устройством.
2. Информационно-измерительная и управляющая система (ИИУС) робота представляет собой локальную вычислительную сеть, узлами которой являются *модули*.
3. В структуре ИИУС робота реализуется принцип распределённого управления.
4. Каждый *модуль* снабжается соответствующим программным обеспечением (ПО) — драйвером, позволяющим включать его в сетевую структуру ИИУС робота без переработки его низкоуровневого программного кода.

Использование принципа функционально-модульного построения МР даёт возможность создать распределённую систему управления. Это такая система, процессы управления в которой максимально независимы друг от друга и распределены между вычислителями модулей; коммуникация процессов происходит через механизм реконфигурации и взаимодействия систем управления (кратко — «язык общения» модулей). Такой механизм позволяет создать систему управления (СУ), общую для всего робота, но распределённую механически и информационно. Среди роботов, представленных в обзоре [1], нет таких, у которых среда межмодульной коммуникации передавала бы команды

тактического или стратегического уровня управления. Однако принцип функционально-модульного построения МР и представленное выше определение модульного МР предполагают передачу, в основном, именно таких команд и данных. Предполагается, что модули частично или полностью реализуют тактический уровень управления, и есть один или несколько модулей, выполняющих роль стратегического уровня. Поэтому ***целью*** настоящей работы является разработка «языка общения» модулей, соответствующего функционально-модульному принципу построения МР.

Для достижения данной цели необходимо:

1. Выбрать тип и топологию коммуникационной сети и метод взаимодействия модулей.
2. Выработать требования к аппаратно-программному обеспечению модулей.
3. Определить систему команд управления модулями.

Выбор топологии

В модульных роботах различных производителей для связи между отдельными модулями используются интерфейсы разных стандартов. Чаще всего коммуникация в этих роботах строится на топологии типа «шина» с локальными ответвлениями. В гетерогенных роботах THOR [4] используется шина RS-485, в гетерогенном роботе SMART — шина CAN [5]. Эти специализированные шины обеспечивают детерминированное время доставки сообщений на уровне стандарта. Это необходимо для устойчивой работы исполнительной системы управления, но избыточно для передачи команд более высоких уровней управления. Для создания распределённой системы управления необходимо применять наиболее стандартные, проверенные и широко распространённые интерфейсы взаимодействия. Многие компании в настоящее время переходят к использованию стандарта Ethernet, который стал (с изменениями и дополнениями) новым стандартом среди промышленных сетей благодаря своей универсальности [6, 7]. Этот стандарт используется и в территориально-распределённой системе управления через Интернет группировкой мобильных роботов [8]. Сеть Ethernet изначально не является шиной — в ней используются соединения типа «один к одному». Имеется возможность преобразовать её, добавив в узлы сети коммутаторы (switch), которые обеспечат соединения (топологию) типа «один ко многим». Таким образом, есть два варианта применимых топологий сети Ethernet: «шина» и «звезда». Выбор топологии необходимо производить на основании требований к желаемой частоте обмена сообщениями, требований к сборочными и экономическим показателям, а также с учётом ограничений функционирования сети той или иной топологии. Например, использование топологии типа «шина» ограничено максимальным количеством коммутаторов на пути соединения «один к одному», которое не должно превышать 4 для минимизации коллизий. Из соображений проработанности сетевого ПО [8] для реализации распределённого управления и минимизации стоимости выберем топологию типа «звезда».

Методы взаимодействия в модульном мобильном роботе

В качестве основы для разработки «языка общения» модулей будем использовать «концепцию драйверов» [8]. Концепция драйверов заключается в том, что для каждого мехатронного устройства (таким является каждый модуль МР) создаётся унифицированный сетевой управляющий протокол на базе существующих низкоуровневых программных интерфейсов взаимодействия. Тогда можно сравнительно просто интегрировать ИИУС модуля в ИИУС робота, создав лишь дополнительный драйвер, реализующий детерминированные протоколом программные инструкции управления и протоколы сетевого взаимодействия. В «концепции драйверов» определено, что минимальным объектом управления является любое электронное или мехатронное устройство, входящее в состав объекта управления. В нашем случае это модуль МР. Тогда ИИУС модульного МР строится как локальная вычислительная сеть, узлами которой являются ИИУС модулей. Для реализации данной концепции был разработан конечный набор программных инструкций управления и сетевых протоколов для создания интерфейса программирования приложений [9]. Этот программный продукт в дальнейшем будем называть библиотекой Интернет-лаборатории (zmq_robot). Она построена на библиотеке ZMQ [10] и позволяет создавать как «драйверы», так и управляющие программы.

Каждый драйвер — это объект класса zmq_robot.RoboWorker. Поскольку объект создаётся безымянным, ему необходимо присвоить имя, по которому его будут находить другие участники сетевого обмена. Каждый драйвер хранит историю поступающих на него значений — шлейф данных (по умолчанию — последние 100 значений). Для передачи информации в zmq_robot данные преобразуются в формат JSON [11]. Это означает, что структура данных должна состоять из следующих типов данных: список, словарь, число и строка. Ключами для словарей должны быть строки, в словарях и списках могут храниться произвольные величины. Объекты класса zmq_robot.RoboWorker будем называть сетевым подмодулем (ПМ). Каждый подмодуль может быть либо входным, либо выходным. Входной подмодуль

только получает информацию (команды) от внешних систем и передаёт эти команды системе управления модуля, а выходной — получает показания от одного из датчиков модуля, формируя шлейф данных, запрошенные части которого отправляет запросившей системе. Первый созданный на вычислителе модуля объект zmq_robot.RoboWorker запускает на нём сервер имён (класс zmq_robot.NameServer). Задача этого сервера — по запросу регистрировать появление и уничтожение объектов zmq_robot.RoboWorker на вычислителе.

Для взаимодействия с модулями, не имеющими возможность создания полноценного сетевого интерфейса на основе zmq_robot, необходимо создать интерфейс, аналогичный zmq_robot, но на основе HTTP-запросов или на основе технологии web-сокетов. Сравнение систем обмена сообщениями на основе библиотеки ZMQ и на основе стандартной библиотеки sockets было произведено в работе [12]. Было показано, что в условиях нестабильности среды передачи данных (кратковременные отключения и задержки) и периодической посылки данных с максимально возможной частотой, система, построенная на основе библиотеки ZMQ, имеет преимущество. Однако, в случае работы в более детерминированной среде с меньшими требованиям к частоте обмена сообщениями, такой как среда модульного МР, можно использовать и технологии HTTP запросов или web-сокетов. Структура данных, их размерности, количество и способы определения задач отдельных подмодулей не регламентируются библиотекой zmq_robot. Поэтому в случае модульного МР с распределённой системой управления, необходимо создать стандартизированный интерфейс.

Требования к программному обеспечению модулей и стандартизации передачи данных

1. ПО каждого модуля с точки зрения сетевого управления должно состоять из:
   - одного или нескольких функциональных сетевых подмодулей,
   - сервера имён;
   - служебных сетевых подмодулей, реализующих общий программный интерфейс модуля.
2. Каждый модуль должен иметь свой уникальный адрес IP, который назначается из набора адресов, уникального для каждого модульного мобильного робота.

В общий программный интерфейс (ОПИ) модуля входят служебные подмодули:

- выходной подмодуль с формальным описанием функциональных подмодулей,
- входной подмодуль, получающий сигнал легального отключения питания в модуле (легальным считается отключение, не нарушающее логику работы файловой и сетевой систем),
- входной подмодуль, получающий актуальный список модулей и создающий сообщения о присоединении или отключении модулей для всех подмодулей,
- входной подмодуль, получающий данные об ошибках в МР.

Данные служебные подмодули необходимо реализовать в виде библиотеки классов для использования в каждом модуле. Покажем представленное выше на примере (рис. 1). В минимальной конфигурации робот состоит из батарейного модуля (БМ), модуля движения (МД), сенсорного модуля (СМ) и модуля сетевого управления (МСУ) [2]. Каждый из модулей обладает своим, уникальным, IP-адресом.

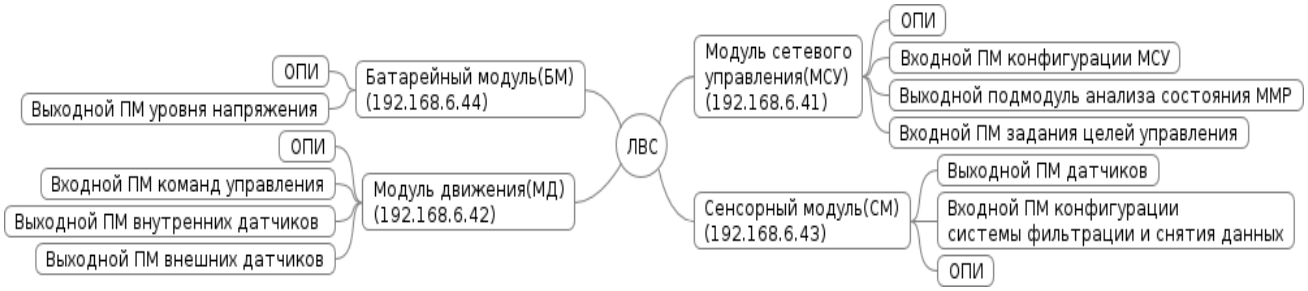


Рисунок 1 – Сетевая структура модульного мобильного робота минимальной конфигурации
(ОПИ — общий программный интерфейс, ПМ — подмодуль)

Служебный выходной подмодуль формального описания предоставляет информацию о всех функциональных подмодулях в виде списка словарей. Каждый словарь — это структурированная информация о возможностях подмодуля. Эта информация состоит из следующих полей: имя подмодуля (например, «внутренние датчики»), тип подмодуля (входной или выходной), порт модуля, который закреплён за данным подмодулем, и, в случае выходного подмодуля, список величин, которые измеряют датчики, принадлежащие подмодулю (с размерностями). Данные, получаемые от модуля движения через служебный выходной подмодуль формального описания, могут выглядеть следующим образом (формат JSON):

[{"имя":"внутренние_датчики", "тип":"выходной", "порт":5502,
"измеряемые_величины":[
{"имя":"одометрический_датчик_левый", "размерность":"м"},
{"имя":"одометрический_датчик_правый", "размерность":"м"},
{"имя":"датчик_тока_левый", "размерность":"А"},
{"имя":"датчик_тока_правый", "размерность":"А"}]},
{"имя":"внешние датчики", "тип":"выходной",.....}]

Служебный входной подмодуль актуализируемого списка модулей получает списки подключённых модулей от внешней системы. Он создаёт события для остальных подмодулей о подключении и отключении других модулей. При этом другие подмодули могут перестраивать логику своей работы при появлении этих модулей.

Подмодуль сообщений об ошибках используется для предотвращения различных повреждений робота. Модуль может находиться в двух состояниях — рабочем и ошибочном. Переход из одного состояния в другое осуществляется при получении сообщений от внешних или внутренних систем. Каждое сообщение может либо установить, либо сбросить состояние ошибки в модуле и имеет приоритет от 1 до 100. Согласно правилам, подмодуль сообщений об ошибках оценивает приоритет каждого сообщения и меняет состояние модуля соответственно, изменяя тем самым логику его работы.

Структура данных, получаемая от выходных функциональных подмодулей, должна представлять собой список из двух вариантов представления значений каждой величины, объявленной в подмодуле формального описания. Первый вариант представления — это величина, преобразованная к размерности, объявленной в подмодуле формального описания, второй вариант представления — это оригинальное значение, полученное при изменении. Если при получении размерной величины происходит фильтрация (например, усреднение), то второе значение является списком из всех использовавшихся для фильтрации величин. В примере ниже представлены списки данных, полученные от выходного функционального подмодуля внутренних датчиков модуля движения из предыдущего примера (конкретные значения приведены только в качестве примера):

[[12,1230], [-12,-1230],
[0.51, [512, 498, 512, 480]],[0.52, [500, 485, 514, 472]]]

Первые два списка — это значения, полученные с одометрических датчиков. Для них применяется простое умножение измеренного значения на коэффициент для приведения к правильной размерности. Вторые два списка — это значения, полученные с датчиков тока силового ключа. Их обработка сложнее, потому что применяется усреднение по нескольким измеренным значениям.

Требования к аппаратно-программной реализации системы управления

Требования к аппаратно-программному обеспечению (АПО) для реализации модуля основываются на требованиях к реализации драйвера, приведённые в работе [12]. АПО системы управления модуля должно иметь:

1) вычислительное устройство, способное работать в сети Ethernet;
2) возможность реализовать все необходимые протоколы взаимодействия;
3) достаточную производительность для реализации функционального назначения модуля;
4) минимальные массогабаритные параметры;
5) минимально возможную стоимость.

В качестве АПО предполагается использовать микроконтроллеры и микрокомпьютеры различных производителей. Как было отмечено ранее, из АПО модулей формируется распределённая система управления робота в целом. Такая СУ может иметь более высокую производительность по сравнению с обычными системами управления, которые построены на одном вычислителе. Наиболее применимыми с точки зрения приведённых выше требований являются микрокомпьютеры Arduino Yun, Raspberry Pi и другие, рассмотренные в работе [8]. При реализации методов взаимодействия на основе HTTP запросов или web-сокетов, можно также использовать менее дорогие решения, состоящие из Arduino Mega и платы дополнения Ethernet.

Система команд управления

Каждый модуль должен обладать системой команд, которая определяет поведение модуля. Команда — это структурированный набор данных о желаемом поведении модуля и является списком из двух элементов: имя и список параметров. Система команд каждого входного подмодуля должна быть задокументирована в служебном подмодуле формального описания в поле словаря подмодуля в виде списка словарей, каждый из которых содержит имя, описание команды на естественном языке и список

параметров, состоящий из словарей с именем параметра, его размерностью, типом и описанием на естественном языке. Система команд для каждого модуля будет уточняться в процессе их разработки, однако уже сейчас можно сформулировать, в первом приближении, систему команд для модуля движения (входной подмодуль «желаемое положение»):

1. Команда "*Относительное_перемещение*". Задаёт смещение модуля по плоскости из текущей точки в системе координат, связанной с модулем. В системе координат положительное направление оси ***y*** соответствует движению вперёд, ***x*** — вправо; отрицательное – соответственно назад и влево. Если смещение невыполнимо, то модуль переходит в состояние ошибки. Параметры (действительные числа):***«x»***, ***«y»*** — величины смещения по осям в метрах, ***«theta***» — изменение ориентации модуля в радианах, ***«dt»*** — длительность движения в секундах.
2. Команда "*Задание_начала_координат*". Если команда передана без параметров, то абсолютная система координат модуля будет совмещена с системой координат, связанной с модулем. Иначе начало абсолютной системы координат будет смещено в точку с заданными координатами и ориентацией. Параметры (действительные числа): ***«x»***, ***«y»*** — желаемые координаты метрах, ***«theta»*** — поворот системы координат в радианах.
3. Команда "*Абсолютное_перемещение*". Задаёт перемещение модуля по плоскости в абсолютной ранее заданной системе координат. Если перемещение невыполнимо, то модуль переходит в состояние ошибки. Параметры (действительные числа):***«x»***, ***«y»*** — желаемые координаты метрах, ***«theta»*** — желаемая ориентация модуля в радианах, ***«dt»*** — длительность движения в секундах.

Требования к модулю сетевого управления

Важнейшим для построения межмодульного взаимодействия является модуль сетевого управления (МСУ). Это модуль, в задачи которого входит распределение команд управления и информации между модулями МР. Он отвечает за поиск и регистрацию новых модулей в сети, реализацию части тактического и стратегического уровней управления, легальное отключение питания в модулях. МСУ взаимодействует как со служебными, так и с функциональными подмодулями.

МСУ периодически производит опрос каждого IP-адреса из набора на наличие по этому адресу сервера имён. Если сервер имён найден, его содержимое добавляется в общую таблицу подключённых модулей и подмодулей, опрашивается служебный подмодуль формального описания и на основе этого обновляется информация о найденных модулях. Если же сервер имён не найден, но до этого присутствовал в списке модулей, то такой модуль считается отключённым. Изменённая информация о модулях рассылается на все модули в служебные подмодули с актуализируемым списком модулей.

МСУ на частоте работы тактического и стратегического уровней системы управления одновременно опрашивает все выходные подмодули всех модулей, запрашивая у них весь шлейф данных, начиная с момента последнего такта опроса. Далее все шлейфы обрабатываются системой управления, и МСУ отправляет на все входные подмодули всех модулей новые команды управления.

Заключение

Рассмотрены некоторые типы и топологии межмодульной коммуникации. В качестве среды предложена сеть Ethernet. Принято, что язык межмодульного общения должен быть основан на концепции «драйверов». В дальнейшем предполагается необходимым рассмотреть различные способы представления информации об окружающем мире, а также методы комплексирования информации от датчиков различной природы с целью уточнения системы команд различных модулей. Также предполагается совместить функции сервера имён и служебного подмодуля с формальным описанием функциональных подмодулей.

Работа выполняется при частичной поддержке РФФИ: грант 16-07-00811а.

1. Андреев В.П. Функционально-модульный принцип построения гетерогенных мобильных роботов / Андреев В.П., Подураев Ю.В. // Экстремальная робототехника. Труды международной научно-технической конференции. – Санкт-Петербург, 2016. (настоящий сборник).
2. Андреев В.П. Разработка функциональных узлов гетерогенного модульного мобильного робота / Андреев В.П., Ким В.Л.// Экстремальная робототехника. Труды международной научно-технической конференции. – Санкт-Петербург, 2016. (настоящий сборник).
3. Development of a Self-Reconfigurable Modular Robotic System / Kohji Tomita, Satoshi Murata, Eiichi Yoshida, Haruhisa Kurokawa, Akiya Kamimura and Shigeru Kokaji // Sensor Fusion and Decentralized Control in Robotic Systems III, Proceedings of SPIE, Vol. 4196, pp. 469-476, 2000.
4. On sub-modularization and morphological heterogeneity in modular robotics / Lyder A.H., Stoy K., Mendoza-Garcia R.-F., Larsen J.C., and Hermansen P. // Intelligent Autonomous Systems 12, volume 193 of Advances in Intelligent Systems and Computing, pp. 649-661. Springer Berlin Heidelberg, 2013.
5. BacaJ. A heterogeneous modular robotic design for fast response to a diversity of tasks / J. Baca, M. Ferre,

and R. Aracil // Robotics and Autonomous Systems, vol. 60, no. 4, pp. 522–531, 2012.
6. GallowayB. Introduction to Industrial Control Networks / Brendan Galloway, Gerhard P. Hancke // URL: http://foresight.ifmo.ru/ict/shared/files/201311/1_135.pdf (датаобращения: 17.03.2016).
7. EtherCAT Technology Group, Industrial Ethernet Technologies // URL: https://www.ethercat.org/download/documents/Industrial_Ethernet_Technologies.pdf (датаобращения: 17.03.2016).
8. Andreev V. Geographically distributed “multi-operator” Control for Mechatronic Devices via the Internet / Victor Andreev, Kirill Kirsanov, Valentin Pryanichnikov // 26th DAAAM Int. Symp. on Intelligent Manufacturing and Automation, 2015. Elsevier. Procedia Engineering (2016) ISSN 1877-7058, 2016.
9. Kirsanov K. Software architecture of control system for heterogeneous group of mobile robots. / Kirill Kirsanov // 25th DAAAM Int. Symp. on Intelligent Manufacturing and Automation, 2014. Procedia Engineering (2015) ISSN 1877-7058, 2015. – V.100. – P.216 – 221.
10. Hintjens, Pieter. "0MQ - The Guide." 2011. // URL:http://zguide.zeromq.org/page:all(датаобращения: 17.03.2016).
11. ECMA-404 1st Edition / October 2013 The JSON Data Interchange Format // URL:http://www.ecma-international.org/publications/files/ECMA-ST/ECMA-404.pdf (датаобращения: 17.03.2016).
12. Андреев В.П. Технология многооператорного управления мобильными роботами через Интернет / Андреев В.П., Кирсанов К.Б.// Известия Южного Федерального университета. Технические науки. ISSN 1999-9429. – Таганрог: 2015. –№10(171). – С.6 – 18.

V.V. Nikiforov[1], V.A. Pavlov[2]

EFFICIENCY OF COMPUTATIONAL RESOURCES SHARING BETWEEN TASKS IN ROBOT CONTROL SYSTEMS

[1]SPIIRAS, Saint-Petersburg
nik@iias.spb.su

[2]CRD IRTC, Saint-Petersburg
vapavlov@rtc.ru

Abstract

The key requirements for program applications providing robot control systems operation are requirements of the warranty of the on-time execution of functions being realized by these systems. An application density that is the maximum achievable quota of processor payloads from application programs is used as the application execution efficiency criterion which depends not only on a composition of the tasks and intertask communications but also on a choice of the combination of system services, i.e. a scheduling discipline and an access protocol to the sharable system resources. The paper presents a suggested method for the application verification on a possibility of usage of the most efficient combinations of system services as well as examples of the efficiency estimation based on simulation modeling of the execution of program applications.

Keywords: Real-time systems, robot control, sharable resources, access protocols, scheduling disciplines, feasibility analysis, application efficiency.

В.В. Никифоров[1], В.А. Павлов[2]

ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАЗДЕЛЕНИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ РЕСУРСОВ МЕЖДУ ЗАДАЧАМИ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ РОБОТАМИ

[1]СПИИРАН, Санкт-Петербург
nik@iias.spb.su

[2]ГНЦ РФ ЦНИИ РТК,Санкт-Петербург
vapavlov@rtc.ru

Аннотация

Для программных приложений, обеспечивающих функционирование систем управления роботами, ключевыми требованиями являются требования гарантий своевременности выполнения реализуемых ими функций. В качестве критерия эффективности исполнения программного приложения используется плотность приложения, т.е. максимально достижимая доля полезной нагрузки на процессоры со стороны прикладных программ, которая зависит не только от состава задач и межзадачных связей, но и от выбора комбинации системных сервисов — дисциплины планирования

и протокола доступа к разделяемым системным ресурсам. В докладе предложен метод проверки программного приложения на возможность использования наиболее эффективных комбинаций системных сервисов, а также приведены примеры оценок эффективности на основе экспериментов по имитационному моделированию исполнения программных приложений.

Ключевые слова: системы реального времени, управление роботами, разделяемые ресурсы, протоколы доступа, дисциплины планирования, анализ выполнимости, эффективность программных приложений.

Введение

Системы управления роботами относятся к классу систем реального времени (СРВ). Для программных приложений, обеспечивающих функционирование систем управления роботами, ключевыми требованиями являются требования гарантий своевременности выполнения реализуемых ими функций. Проверка программных приложений СРВ на обеспечение этих требований называется *анализом выполнимости*. Как правило, программные приложения СРВ состоят из относительно самостоятельных взаимодействующих задач [1]. Значения времени отклика каждой из задач τ_i, составляющих многозадачное программное приложение, зависят не только от структуры приложения, но и от выбора используемой дисциплины планирования и применяемого протокола доступа к разделяемым информационным ресурсам.

Параметрические характеристики

Простейшие параметрические модели программных комплексов СРВ ориентированы на приложения, состоящие из независимых задач τ_1, τ_2, …, τ_n. Под *независимостью* задач понимается отсутствие межзадачных интерфейсов, которые могут переводить задачу в состояние ожидания действий, выполняемых другими задачами. Задачи, которые могут находиться в состоянии ожидания таких действий, относятся к разряду *взаимозависимых* задач.

Очередная, *j*-ая активизация задачи τ_i означает порождение очередного *j*-го ее экземпляра — порождение *задания* $\tau_i^{(j)}$. Порождение задания означает увеличение числа претендентов на процессорное время, и, следовательно, изменение условий распределения процессорного времени. В моделях СРВ, ориентированных на анализ выполнимости, каждой из задач τ_iсопоставлены значения C_i и T_i, характеризующие *вес* задачи τ_i и *период* ее активизации, соответственно. Вес C_i — максимальное процессорное время, необходимое для однократного исполнения задачи τ_i. В синхронных системах период T_i — длина интервала времени между порождениями заданий $\tau_i^{(j)}$ и $\tau_i^{(j+1)}$. В асинхронных системах период T_iпредставляет допустимый минимальный интервал времени между порождениями заданий $\tau_i^{(j)}$ и $\tau_i^{(j+1)}$. Производный параметр $u_i = C_i / T_i$ представляет значение *нагрузки* — долю процессорного времени, требуемую для исполнения экземпляра задачи τ_i. Для оценки выполнимости программного приложения используют значение *интегральной нагрузки* $U = \sum_{i=1}^{n} u_i$. В случае однопроцессорной системы с одноядерным процессором для выполнимости приложения необходимо, чтобы интегральная нагрузка U не превышала единицы. В случае многоядерного процессора с *m*ядрами необходимо, чтобы выдерживалось неравенство $U \le m$.

Порядок предоставления процессорного времени для обслуживания активных заданий задается *дисциплиной планирования*, определяющей способ наделения заданий целочисленными *приоритетами*. Условимся индексировать задачи τ_1, τ_2, …, τ_n, составляющие приложение, в порядке снижения приоритета: τ_1 — наиболее приоритетная задача, τ_n— наименее приоритетная.

Наиболее распространенной дисциплиной планирования со статическими приоритетами является *темпо-монотонная* (RM— *RateMonotonic*): приоритеты задач снижаются в порядке увеличения значений T_i. Наиболее распространенной дисциплиной планирования с динамическими приоритетами является EDF (EarliestDeadlineFirst) [2]: задание $\tau_x^{(i)}$ является более приоритетным относительно задания $\tau_y^{(j)}$, если предельно допустимый момент времени $d(\tau_x^{(i)})$ завершения задания $\tau_x^{(i)}$ наступает раньше, чем предельно допустимый момент времени $d(\tau_y^{(j)})$ завершения задания $\tau_y^{(j)}$.

Задание является *активным* в некоторый конкретный момент времени, если к этому моменту оно уже порождено, но еще не завершено. Другими словами, каждое задание является активным в рамках

интервала его существования от момента порождения $t_{\text{arr}}(\tau_i^{(j)})$ до момента завершения $t_{\text{end}}(\tau_i^{(j)})$.

Любой экземпляр $\tau_i^{(j)}$ независимой задачи τ_i на интервале $[t_{\text{arr}}(\tau_i^{(j)}), t_{\text{end}}(\tau_i^{(j)})]$ существования задания может находиться в одном из двух *системных состояний*: задание, владеющее исполнительным ресурсом, находится в состоянии «*текущее*»; задание, ожидающее предоставления ему исполнительного ресурса, находится в состоянии «*готовность*». Экземпляры взаимозависимых задач могут, помимо двух указанных состояний, находиться еще и в состоянии «ожидание», когда они ожидают действий, выполняемых другими задачами.

Система реального времени должна гарантировать своевременность исполнения заданий: продолжительность $r_i^{(j)} = t_{\text{end}}(\tau_i^{(j)}) - t_{\text{arr}}(\tau_i^{(j)})$ интервала существования любого экземпляра $\tau_i^{(j)}$ задачи не должна превышать максимально допустимого значения D_i. Используя понятие *время отклика* $R_i = \max\{r^{(j)} \mid j = 1, 2, ...\}$ задачи τ_i, требование *выполнимости* задачи можно выразить неравенством $D_i \geq R_i$.

Независимые задачи не могут попадать в состояние ожидания. Для проверки выполнимости программного приложения состоящего из n независимых задач достаточно использоватьстандартные методы [2]. Но большинство реальных программных приложений СРВ содержит *взаимозависимые* задачи, для которых возможно попадание в состояние ожидания сигнальных сообщений от других задач. Это означает, что интервал существования задания $\tau_i^{(j)}$, принимающего сигнальное сообщение, может содержать такие участки, в рамках которых процессор занят исполнением заданий, менее приоритетных чем $\tau_i^{(j)}$. Такие участки называются интервалами *блокирования* задания $\tau_i^{(j)}$. Суммарная продолжительность $b_i^{(j)}$ пребывания задания $\tau_i^{(j)}$ в состоянии блокирования влияет на величину $r_i^{(j)}$. Максимально возможное для заданий типа τ_i значение времени отклика $B_i = \max\{b_i^{(j)} \mid j = 1, 2, ...\}$ называется *фактором блокирования*. Используемая для анализа выполнимости модель программного приложения, содержащего взаимозависимые задачи, должна состоять из n кортежей $<C_i, T_i, D_i, B_i>$.

Структурные характеристики

В структурных моделях программных приложений код задачи представляется в виде последовательности сегментов, завершаемых одним из операторов, связанных с системными событиями. Логическая корректность задачи требует целостности разделяемых информационных ресурсов, которая, как правило, реализуется с помощью мьютексов [3]. В этом случае код задачи должен содержать сегменты, завершаемые операторами lock(g) (запрос на вход в критический интервал по доступу к ресурсу g) и unlock(g) (выход из критического интервала и освобождение ресурса g). В качестве примера рассмотрим задачи, использующие в качестве операторов, связанных с системным событием, только операторы lock, unlock и оператор end, соответствующий финальному сегменту задачи.

Формальное представление сегмента начинается спецификатором типа сегмента и завершается указателем веса сегмента. В нашем случае спецификаторами сегмента являются спецификаторы сегмента типа lock (символ ‘`L`’), сегмента типа unlock (символ ‘`U`’) и финального сегмента (символ ‘`E`’). Вес сегмента представлен целым числом, отражающим объем вычислений, исполняемых в рамках сегмента, в виде эквивалентного количества эталонных операций. Представление финального сегмента содержит только спецификатор ‘`E`’и указатель веса. В представлении сегментов типа lock и unlockмежду спецификатором и указателем веса помещается целое число, соответствующее номеру запрашиваемого или освобождаемого ресурса, соответственно. Например, запись `L_1_10` представляет сегмент с весом 10, завершающийся запросом доступа к ресурсу с номером 1.

Для представления значения периода выполнения задачи используется конструкция вида `T=1000`, обозначающая период задачи равный 1000 единицам времени, например, микросекундам. Значения D_i представлены конструкцией вида `D=1000`, означающей в данном случае, что длительность существования любого экземпляра задачи не должна превышать 1 миллисекунды.

Формальное представление модели задачи имеет вид строки, начинающейся описаниями ее параметров, за которыми следует описание последовательности сегментов ее кода. Описания отдельных

параметров и сегментов разделены пробелами. Например, для периодической задачи τ_i, представленной строкой:

τ_i:T=1000 D=1000 L_1_10 U_1_40 E_20 ,

экземпляры $\tau_i^{(j)}$ порождаются через 1 мс, допустимая продолжительность существования каждого экземпляра не превышает 1 мс, объем вычислений W_i задачи τ_i составляет 70 эталонных операций.

Вес C_iзадачи τ_i, зависит от производительности P процессора, выраженной числом эталонных операций, выполняемых процессором за единицу времени: $C_i = W_i / P$. Величина $u_i = C_i/T_i$характеризует *нагрузку* — долю процессорного времени, расходуемого задачей τ_i. Сумма $U=\sum_{1\le i\le n} u_i$ составляет общую нагрузку на процессор от многозадачного приложения.

Рассмотрим три варианта модели приложения с пятью задачами, разделяющими пять ресурсов g_1, g_2, g_3, g_4, g_5. Первый вариант — известный методический пример «Пять обедающих философов» [4]:

```
τ1:  T=100  D=100  L_1_001  L_2_001  U_1_012  U_2_001  E_001
τ2:  T=115  D=115  L_2_001  L_3_001  U_2_013  U_3_001  E_001
τ3:  T=133  D=133  L_3_001  L_4_001  U_3_016  U_4_001  E_001        (1)
τ4:  T=152  D=152  L_4_001  L_5_001  U_4_019  U_5_001  E_001
τ5:  T=175  D=175  L_5_001  L_1_001  U_5_023  U_1_001  E_001
```

Наличие пересекающихся критических интервалов в структуре приложения свидетельствует о возможности возникновения тупиков и клинчей. Под тупиком понимается состояние системы, при котором все задачи попали в состоянии "ожидание". Под клинчем понимается состояние системы, при котором часть задач связана кольцом взаимных ожиданий, но еще остается подмножество задач, способных выполняться неопределенно долго.

Каждая из задач приложения (1) может находиться в одном из шести состояний: состояние $S = 0$ (задача не активизирована), состояния $S = 1$, $S = 2$, $S = 3$, $S = 4$, $S = 5$ (исполняется, соответственно, первый, второй, третий, четвертый и пятый сегмент задачи).

Комбинация состояний задач образует вектор $<S(\tau_1), S(\tau_2), S(\tau_3), S(\tau_4), S(\tau_5)>$ состояния приложения. Если в какой-то момент работы приложения (1) оно приходит в состояние < 2, 2, 2, 2, 2 >, то ни одна из задач не сможет перейти в свое следующее состояние $S = 3$ из-за того, что задача τ_i владеет ресурсом g_i ($i = 1, \ldots, 4$), а для перехода в состояние $S(\tau_i) = 3$ задаче τ_i требуется ресурс g_{i+1}, занятый задачей τ_{i+1} ($i = 1, \ldots, 4$). Задаче τ_5 требуется ресурс g_1, занятый задачей τ_1. Таким образом приложение (1) оказывается в состоянии тупика.

Модель многозадачной системы может быть проверена на возможность возникновения тупиков построением ориентированного графа состояний с вершинами, представляющими достижимые состояния и дугами, представляющими возможные переходы из одного состояния в другое. Возникновение тупика возможно, если в графе есть вершина, не содержащая исходящих дуг.

Сложнее проверить граф состояний на отсутствие возможности возникновения клинчей. Второй из рассматриваемых вариантов приложения из пяти задач представляется кодом:

```
τ1:  T=100  D=100  L_1_001  L_5_001  U_1_012  U_5_001  E_001
τ2:  T=115  D=115  L_2_001  L_3_001  U_2_013  U_3_001  E_001
τ3:  T=133  D=133  L_3_001  L_4_001  U_3_016  U_4_001  E_001        (2)
τ4:  T=152  D=152  L_4_001  L_2_001  U_4_019  U_2_001  E_001
τ5:  T=175  D=175  L_1_001  L_5_001  U_1_023  U_5_001  E_001
```

Приложению (2) соответствует граф состояний, в котором нет вершин без исходящих дуг, однако, существует вероятность взаимного блокирования. Если в какой-то момент работы приложения оно приходит в одно из состояний, при котором $S(\tau_2) = 2$, $S(\tau_3) = 2$, $S(\tau_4) = 2$, то возникает клинч — задачи τ_2, τ_3, τ_4 оказываются связанными отношением взаимного блокирования.

Эффективный способ анализа структуры приложения с пересекающимися критическими интервалами на возможность возникновения тупиков и клинчей основан на построении и анализе специального многодольного ориентированного графа зависимостей связок критических интервалов [5]. Данный анализ позволяет не только обнаружить возможность взаимного блокирования задач, но и найти варианты локальной модификации структуры приложения, позволяющие устранить такую возможность. Рассмотрим третий вариант приложения из пяти задач:

```
τ1:  T=100  D=100  L_1_001  L_5_001  U_1_012  U_5_001  E_001
τ2:  T=115  D=115  L_2_001  L_3_001  U_2_013  U_3_001  E_001
τ3:  T=133  D=133  L_3_001  L_4_001  U_3_016  U_4_001  E_001        (3)
```

```
τ4:  T=152  D=152  L_2_001  L_4_001  U_4_019  U_2_001  E_001
τ5:  T=175  D=175  L_1_001  L_5_001  U_1_023  U_5_001  E_001
```

В варианте (3) возможность возникновения клинча отсутствует, хотя его отличие от (2) состоит лишь в порядке следования операторов `L_2` и `L_4` в задаче τ_4. Это может быть проиллюстрировано построением графов зависимостей связок критических интервалов для приложений (2) и (3).

Граф зависимостей связок

Два критических интервала задачи τ по *головному* g и *дополнительному* g^* *ресурсам* назовем *связанными*, если они содержат общие сегменты кода задачи. Связка $L = <\tau, g, g^* >$, образованная связанными критическими интервалами, состоит из трех участков. На *головном* участке задача τ имеет доступ к ресурсу g, на центральном участке — доступ к обоим ресурсам связки, на завершающем участке один из ресурсов связки уже освобожден задачей τ. Центральный участок состоит из сегментов, образующих пересечение критических интервалов.

Каждая из задач приложения (2) содержит одну связку: τ_1 — связку $L_a = <\tau_1, g_1, g_5>$, τ_2 — связку $L_b = <\tau_2, g_2, g_3>$, τ_3 — связку $L_c = <\tau_3, g_3, g_4>$, τ_4 — связку $L_d = <\tau_4, g_4, g_2>$, τ_5 — связку $L_e = <\tau_5, g_1, g_5>$. Необходимым условием возникновения взаимных ожиданий является наличие в программном приложении таких пар связок, для которых имеет место отношение зависимости: $L_x = <\tau_i, g_a, g_b>$ является *зависимой* от $L_y = <\tau_k, g_c, g_d>$, если они принадлежат разным задачам и $g_b = g_c$(головной ресурс связки L_y совпадает с дополнительным ресурсом связки L_x).

Факт зависимости связки L_xот связки L_yобозначим символом «→». Для приложения (1) имеют место зависимости $L_a \rightarrow L_b$, $L_b \rightarrow L_c$, $L_c \rightarrow L_d$, $L_d \rightarrow L_e$и $L_e \rightarrow L_a$. Эти зависимости отражаются построением многодольного ориентированного *графа зависимостей связок*, в котором каждая связка представлена вершиной графа, а наличие дуги из вершины L_x в вершину L_y означает, что связка L_x зависит от связки L_y. Каждой задаче соответствует отдельная доля графа. На рисунке 1 приведены графы зависимостей связок для приложений (1), (2) и (3).

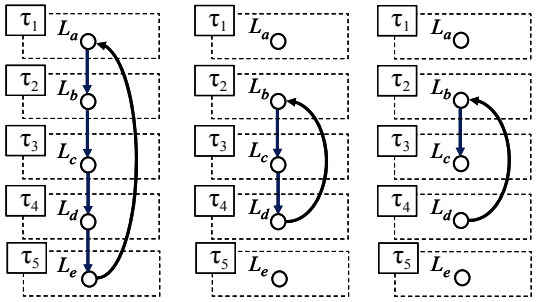


Рисунок 1 — Графы зависимостей связок критических интервалов:а) для приложения (1); б) для приложения (2); в) для приложения (3)

Отношение зависимости связок транзитивно. На рисунке 1*в* зависимость $L_d \rightarrow L_b$ означает, что выход задачи τ_4 из головного участка связки L_d может быть блокирован до тех пор, пока задача τ_2 не выйдет из головного участка своей связки L_b, а зависимость $L_b \rightarrow L_c$ означает, что выход задачи τ_2 из головного участка связки L_b может быть блокирован задачей τ_3 до ее выхода из головного участка связки L_c. Следовательно, может возникнуть такая ситуация, при которой задача τ_4 блокируется (транзитивно, через задачу τ_2) задачей τ_3 из-за цепочки зависимостей $L_d \rightarrow L_b \rightarrow L_c$. На рисунке 1*б* эта транзитивная зависимость замкнута, т.к. в графе зависимостей связок приложения (2) существует контур зависимостей связок $L_d \rightarrow L_b \rightarrow L_c \rightarrow L_d$. Именно наличие этого контура может вызвать взаимное блокирование задач τ_2, τ_3, τ_4 в приложении (2).

Каждому варианту взаимного блокирования задач соответствует контур в графе зависимостей связок. Если в графе зависимостей связок таких контуров нет, то возможность взаимного блокирования задач отсутствует. Наличие на рисунке 1*а* контура, охватывающего все пять задач, свидетельствует о возможности возникновения тупика.

Протоколы доступа к ресурсам

Стандартный способ обеспечения логической корректности приложений с взаимозависимыми задачами основан на оснащении синхронизирующих механизмов специальными протоколами доступа к разделяемым информационным ресурсам [6]. Для простейшего протокола PP(PrimitiveProtocol) доступа к ресурсам единственное условие удовлетворения запроса со стороны задачи τ на доступ в критический интервал по ресурсу gсостоит в том, чтобы ресурс g был свободен. Однако данный протокол не устраняет опасность возникновения тупиков и клинчей.

Для предотвращения возможности взаимного блокирования задач был предложен протокол пороговых приоритетов PCP(PriorityCeilingProtocol), обеспечивающий дополнительную проверку текущего состояния других разделяемых ресурсов. Задаче разрешается занять ресурс в том случае, если уровень ее базового приоритета выше, чем пороговые приоритеты всех ресурсов, занятых другими задачами. Однако применение PCPвозможно лишь при использовании дисциплин планирования со статическими приоритетами задач, эффективность которых ниже, чем эффективность дисциплин планирования с динамическими приоритетами. Численный критерий оценки

эффективности применения конкретной дисциплины планирования для программных приложений с конкретной структурой (*плотность* конфигурации программного приложения) предложен в работе [7].

Плотность конфигурации программного приложения

В качестве критерия эффективности конфигурации программного приложения, может использоваться предельное значение суммарной нагрузки, соответствующее минимальной производительности процессора, при которой приложение еще остается выполнимым. Обозначим такое предельное значение суммарной нагрузки через *Dens* и назовем его *плотностью* конфигурации приложения.

Построение и анализ графа связок критических интервалов позволяет определить, действительно ли есть необходимость применения PCP или применение PCP вызывает только снижение эффективности исполнения приложения. В рассмотренных примерах приложение (2) действительно требует применения PCP, но приложение (3) может быть успешно реализовано и с PP. На рисунке 2 приведены полученные в результате имитационного моделирования данные об эффективности реализации приложения (3) на одноядерном и двуядерном процессоре с использованием следующих комбинаций методов разделения исполнительных и информационных ресурсов: RM+PCP, RM+PP, EDF+PP. Графики значений *Dens* построены для разных значений предельных сроков выполнения задач при фиксированных значениях периода T_iдля приложения (3).

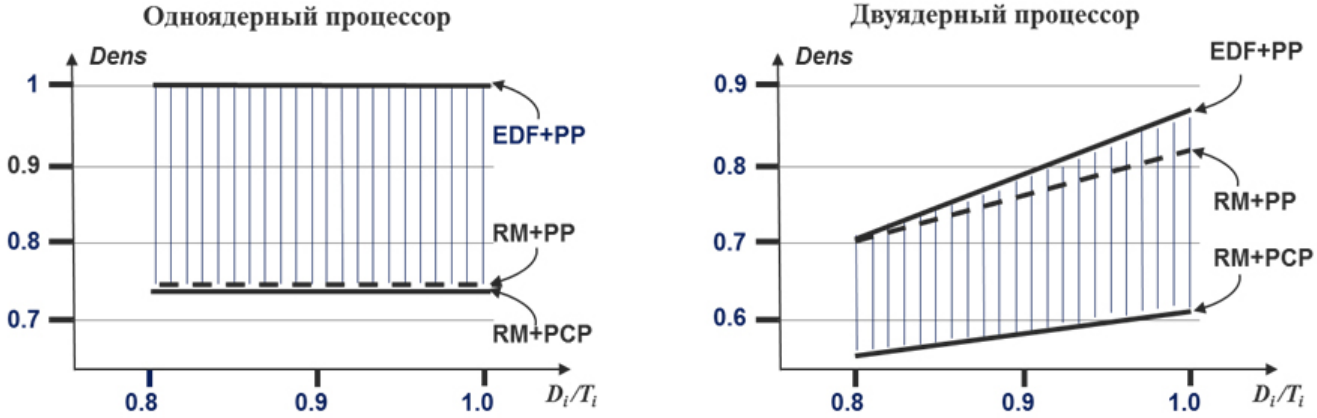


Рисунок 2—Значения *Dens* при реализации приложения со структурой (3) с разными комбинациями дисциплин планирования и протоколов доступа к ресурсам

Из рисунка 2 видно, что применение PCPприводит к снижению эффективности использования процессорного времени. С таким снижением эффективности приходится мириться, если возможность возникновения взаимного блокирования задач действительно существует. Но если возможность возникновения тупиков и клинчей отсутствует, то необходимость применения PCP отпадает.

Заключение

Результаты имитационного моделирования исполнения программных приложений СРВ, к которым относится и программное обеспечение систем управления роботами, на многоядерных процессорах показывают, что применение протокола PCP для реализации приложений с взаимозависимыми задачами приводит к снижению полезной нагрузки на десятки процентов. Вместе с тем применение протокола, исключающего возможность взаимного блокирования задач, необходимо лишь в том случае, если такая опасность взаимного блокирования действительно существует.

Наличие опасности взаимного блокирования задач, которая вызывает необходимость применения PCP, может быть проверено методом анализа многодольного графа связок критических интервалов. Если данный анализ демонстрирует отсутствие возможности взаимного блокирования задач, то можно использовать простейший протокол доступа к разделяемым ресурсам, позволяющий применять высокоэффективные дисциплины планирования с переменными приоритетами задач и избежать снижения эффективности программного приложения.

1. Давиденко К.Я. Технология программирования АСУТП. Проектирование систем реального времени, параллельных и распределенных приложений. — М.: Энергоатомиздат, 1985. — 183 с.
2. Данилов М.В. Методы планирования выполнения задач в системах реального времени // Программные продукты и системы. — 2001, №4. — С. 28-35.
3. Laplante P.A. Real-Time Systems Design and Analysis. — John Wiley & Sons, Inc., 2004. — 530 p.
4. Питерсон Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем. — М.: Мир, 1984. — 263 с.

5. Никифоров В.В., Павлов В.А. Структурные модели для анализа многозадачных программных систем // Информационно-измерительные и управляющие системы, №9, т.9, 2011, С. 19-29.
4. Sha L., Rajkumar R., Lehoczky J.P.: Priority Inheritance Protocols: An Approach to Real-Time Synchronization // IEEE Transactions on Computers. — September, 1990. — Vol. 39(9). — P. 1175-1185.
5. Baranov S., Nikiforov V. Density of Multi-Task Real-Time Applications // Proceedings of the 17th Conference of Open Innovations Association FRUCT, Yaroslavl, Russia, April 2015, P. 20-24.

Ф. Шнайдер, Б. Джесперс, А. Тидерко, О. Каторгин, Д. Вайлдермас

БЕСПИЛОТНЫЕСИСТЕМЫДЛЯРАДИОЛОГИЧЕСКОГОИЯДЕРНОГОИЗМЕРЕНИЯИО ТОБРАЖЕНИЯ

Институт коммуникации Фраунгофера, Германия
frank.schneider@fkie.fraunhofer.de

Аннотация

Рассмотрено применение беспилотных транспортных средствах в сценариях, включающих радиологические и ядерные угрозы. В статью включены данные о европейских испытаниях роботов, проводимых в данной области (ELROB),данные о семинаре-испытаниях в 2017 году по беспилотному радиационному измерению в районе недействующей атомной электростанции.

Ключевые слова: беспилотные транспортные средства, беспилотные системы, Европейские испытания наземных роботов (ELROB).

Frank E. Schneider, Bastian Gaspers,
Alexander Tiderko, Oleg Katorgin, Dennis Wildermuth

UNMANNED SYSTEMS FOR RADIOLOGICAL AND NUCLEAR MEASURING AND MAPPING

Fraunhofer Institute for Communication, Information Processing and Ergonomics FKIE
Fraunhofer Straße 20, 53343 Wachtberg, Germany
frank.schneider@fkie.fraunhofer.de

Abstract

There is significant potential for the use of unmanned vehicles in scenarios involving radiological and nuclear threats. The paper presents the work of the European Reference Network for Critical Infrastructure Protection on the use of unmanned systems for scenarios involving radiological and nuclear threats. This is accompanied by reporting on the latest trials in this area of application, conducted in the last European Land Robot Trial (ELROB). The paper also discusses the combined ERNCIP workshop & trial in 2017 on unmanned radiation measurement and sampling in an inoperative nuclear power plant.

Keywords: unmanned vehicles, unmanned systems, European Land Robot Trial (ELROB).

1. Introduction

There is significant potential for the use of unmanned vehicles in scenarios involving radiological and nuclear threats. The European Reference Network for Critical Infrastructure Protection (Erncip) has therefore established a thematic group on the Protection of Critical Infrastructure from Radiological and Nuclear Threats. The group looks at issues such as certification of radiation detectors, standardisation of deployment protocols, response procedures and the use of unmanned systems, for example in the event of criminal or unauthorised acts involving nuclear or other radioactive material out of regulatory control.

These threats involve measurement and sampling scenarios that are too risky for humans to carry out. For these scenarios, unmanned radiation measurements and sampling, using robots needs to be developed. Note that the use of such as unmanned ground vehicles (UGVs) and small size unmanned planes (UAVs) may be even more cost effective than the use of manned vehicles or planes. Situations envisaged for the use of remote controlled measurement and sampling devices are:

- reactor supervision and related accidents, such as Chernobyl and Fukushima;
- illicit release of radioactive material (radiological dispersion devices and dirty bombs before or after an explosion;
- search of sources out of regulatory control;
- long-term measurements.

Lessons learned from incidents such as Fukushima and Chernobyl, as well as the decommissioning of old nuclear power plants, show that robots have some advantages. Robots can operate in areas with high radiation or danger of explosives, for example boiling liquid expanding vapour explosions (BLEVEs), collapsing structures, improvised explosive devices (IEDs), booby traps and heat.

Additionally, they have the ability to manipulate the environment and to take potentially heavy samples, as they usually have a high payload. Robots can also be used for long-time surveillance of contaminated areas and monitoring the movements of a threat with real-time data from multiple mobile sensors [4, 5].

Despite the huge potential presented by the use of robots, no standards, Best-Practices or norms for sampling or taking measurements have been developed for these systems. The development of such methods could prove to be very beneficial not only for Critical Infrastructure Protection (CIP). For example, the use of unmanned aerial vehicles to perform standardised measurements of the radioactive plume from a nuclear reactor incident or dirty bomb explosion is of tremendous importance to emergency response personnel. This type of information could be used in atmospheric transport modelling calculations, which are important parts of the decision support systems.

The following section will outline the work done by the ERNCIP thematic group on Radiological and Nuclear Threats (RNTs). Section 3 will sketch the trials that have been or will be conducted on the ELROB 2016 and ERNCIP 2017 respectively.

2. ERNCIP

The ERNCIP thematic group on RNTs has been active since 2014. A sub group, which is focusing on the use of unmanned systems, has so far produced three major reports[1] on the following topics:

2.1. Current state of the art of unmanned systems with potential to be used for radiation measurements and sampling

The report [1] is about current state-of-the-art of unmanned systems that have potential to be used for radiation measurements and sampling. It is believed that search and rescue robotics is the domain that is closest to the robots applicable to the radiation measurement scenarios. Therefore, a definition for search and rescue robots and outlines of their major subsystems are given. This is followed by a review of deployment scenarios for search and rescue robots outlining case studies of major emergencies at which robots have been deployed — with an assessment of their value to the emergency services. Additionally, research and development in search and rescue robotics, including current projects, testing environments and search and rescue robotics competitions, is outlined. Furthermore, this report shows unmanned robots and concepts for sensor systems capable of radiation detection based on state-of-the-art radiation sampling using unmanned ground vehicles, unmanned aerial vehicles with rotary wings or unmanned aerial vehicles with fixed wings.

2.2. Possible scenarios for radiation measurements and sampling using unmanned systems

This work [2] focuses on possible scenarios for remote control radiation measurements and sampling using unmanned systems. We identified scenarios that can be separated in two categories. First, there are prevention scenarios where unmanned systems can be used to prevent incidents involving radioactive material and deterrence. Second, there are response scenarios where unmanned systems can be used to gather information after incidents with radioactive material have occurred. We further condensed three main tasks

1. spatial mapping of RN sensor data (exploration, change detection, etc.);
2. searching for RN sources (active sensing, isocurves, hotspots, etc.);
3. sampling (air sampling, sweep sampling and material sampling).

for unmanned systems in the identified scenarios. In addition, the report summarises possible standards for unmanned systems. A very widely recognised standard collection of software frameworks for robot software development is the robot operating system. Further important standards concerning communication with robots and control of unmanned systems are battle management language, interoperability profile and joint architecture for unmanned systems.

[1] https://erncip-project.jrc.ec.europa.eu/networks/tgs/nuclear

Figure 1- Hazardous operations and emergency response in the intersection between emergency services, (para-)military and law enforcement

2.3. Survey on the use of robots/unmanned systems in scenarios involving radiological or nuclear threats

The group designed questions for a survey [3] with experts from the radioactive and nuclear materials (RN) and robotics communities that were circulated through different channels, such as mailing lists and professional social media groups. The questionnaire was also used to raise public interest in this topic and to get more insight and additional views from experts in this field and related subjects. One further aim was to obtain information from the experts and to bring the different communities of roboticists and RN experts together. The questionnaire succeeded in getting information from scientists, especially from the robotics community, as they are well represented in the answers, but it lacks answers from industries and end-user communities. Most of the respondents agreed on the scenarios that were identified in "Possible scenarios for radiation measurements and sampling using unmanned systems". About additional sensors, most people suggested including position and time to radiation measurements. The answers on bottlenecks and future topics point to robots' manoeuvrability, autonomy and communication as well as decontamination and human–robot interaction.

3. ELROB

Since 2006, the European Land Robot Trial (ELROB[2]) successfully provides real world scenarios to test the state of the art in outdoor and/or off-road robotics, mainly for Europe. ELROB offers realistic scenarios, which have been developed in close co-operation with users and practitioners to reflect the up-to-date requirements. Therefore, the event is not organised as a competition but as a trial, allowing academia, industry and users to work together synergetically. The community has the chance to assess current technology as well as to pilot and govern the further development. The major difference to other competitions [7] is that not only the tasks and scenarios are designed by the users but also the performance of the systems is assessed by field experts. Furthermore, the event offers the fantastic opportunity to mingle with the international experts from the field, the industry and the R&D sector [6].

3.1. ELROB 2016

In 2016, the ELROB was hosted by the Austrian Army in the Tritolwerk in Eggendorf. The Tritolwerk is an old ordnance factory, which is used for CBRNE training as well as training for emergency services.

[2]http://www.elrob.org/

Figure 2 - Partial view of the Tritolwerk in Eggendorf, Austria

These premises gave the perfect setting for a very special scenario: Reconnoitring of urban structures with focus on radiological and nuclear measuring and mapping. This was the first real world live scenario with strong radiation sources (Co60, 2,8GBq each) on a robotics competition ever! The task was to search and detect an unknown number of hidden radiation sources. The system should measure the radiation, display the measurement to the operator, acquire imagery and mark the position of the source in the online-build map representation.

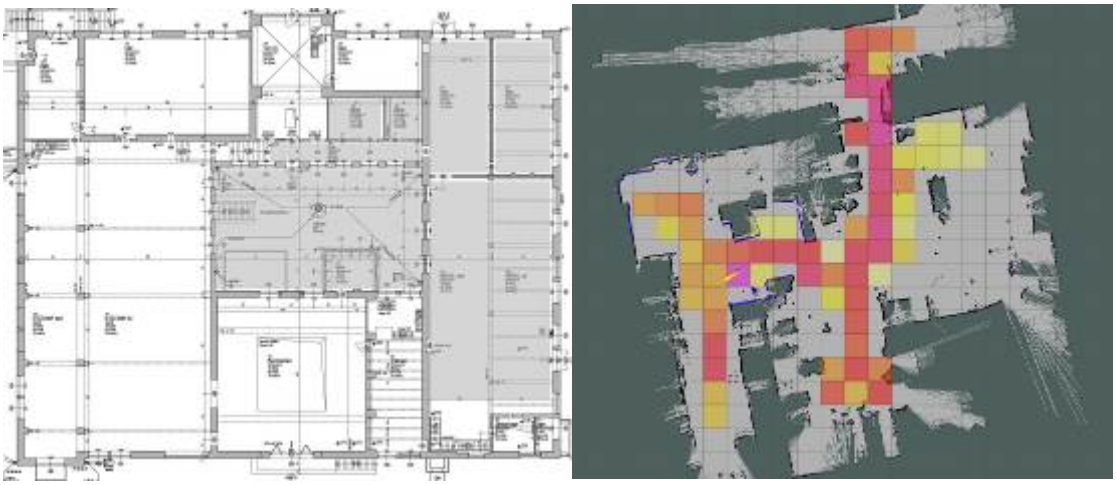


Figure 3 - Footprint of building to inspect (left), example of combined laser / radiation map (right)

About 10 teams participated in the scenario. Since this was the first attempted of this scenario in the ELROB trials, the expectations were curbed. However, the teams performed reasonable well under the given circumstances. Most of the teams had some readings. In the end, it was obvious that there was not enough background knowledge within the teams on radiation detection to produce better results. We believe this will improve in future events. The scenario will remain within the ELROB trials and associated with the upcoming ERNCIP event mentioned in the next section.

3.2. ERNCIP 2017

In spring 2017, the ERNCIP task group on Radiological and Nuclear Threats is planning to conduct a workshop on the use of unmanned systems in the RNTs domain.The workshop will focus on the use of standards (e.g. ANSI N42, list-mode, ROS, NATO ATP-45, etc.) for unmanned systems in this field of application. It will be run in conjunction with a robotic trial similar to the one at ELROB but more sophisticated. The plan is to have both events in the inoperative nuclear power plant Zwentendorf[3], Austria. The teams will be provided with free detectors as well as with the necessary interface software. The task will

[3]https://en.wikipedia.o
rg/wiki/Zwentendorf_Nuclear_Power_Plant

be similar to the one at ELROB: search and locate the unknown number of sources and map the radiation as well as the environment. All information has to be passed onto a reachback team for further evaluation. If possible, another task for the unmanned systems will be mobile manipulation in this Hazardous Materials Incident Response Operations (HAZOPER) mission.

Figure 4 - Nuclear Power Plant Zwentendorf, Austria (pictures: Wikipedia)

4. Conclusion

The problems of robots in the field of hazardous operations and emergency response and especially in threats involving radiological and nuclear components are diverse. Trials like ELROB have shown that there still are several technical challenges, such as communication, sensors, situational awareness, mobility/locomotion and robustness. Some of these just accrue from the fact that these systems have not been used enough to gather a solid treasure trove of experience. There are still a lot of lessons to be learned.

The ERNCIP thematic group on RNTs has also identified a huge gap between what the research and development community is able to deliver, the existing industry state of the art and the user requirements (if properly determined). This includes the complete absence, non-observance or non-compliance of standards, Best-Practices and norms.

Naturally, the research and development community does not have a focus on standardisation, manageability, sustainability, robustness or reliability. A more constructive way ahead might the use of trials and challenges for the unmanned systems community. These events can be used to bring together users, academia and industry. The users can visualise their needs as real world scenarios that have to be tackled by the R&D community and industry. At the same time, the industry will be able to mingle with the R&D community to improve their innovation gap.

5. Acknowledgements

We would like to thank our special guests at the ELROB for their support:
Albert Efimov
Head of the Centre for Robotics Studies at Skolkovo Foundation
Head of Skolkovo Fund Robotic Centre
Prof. Sergey Tsarichenko
Head of Robotics Centre of the All Russian Fire Research Institute
Ministry of the Russian Federation for Civil Defence, Emergencies and
Elimination ofConsequence of Natural Disasters (EMERCOM)
Prof. Alexander Lopota
Director and Chief Designer of the Central Research Institute of Robotics and Technical Cybernetics

1. F. E. Schneider, B. Gaspers, K. Peräjärvi, M. Gårdestig, *Current state of the art of unmanned systems with potential to be used for radiation measurements and sampling*, EC JRC IPSC, Ispra (VA), Italy, March 2015

2. F. E. Schneider, B. Gaspers, K. Peräjärvi, M. Gårdestig, *Possible scenarios for radiation measurements and sampling using unmanned systems*, EC JRC IPSC, Ispra (VA), Italy, 2015.
3. F. E. Schneider, B. Gaspers, *Survey on the use of robots/unmanned systems in scenarios involving radiological or nuclear threats*, EC JRC IPSC, Ispra (VA), Italy, 2015.
4. Frank E Schneider, Jochen Welle, Dennis Wildermuth, Markus Ducke, *Unmanned multi-robot CBRNE reconnaissance with mobile manipulation System description and technical validation*.IEEE Carpathian Control Conference (ICCC), 2012 13th International.
5. Frank E Schneider, Dennis Wildermuth, Markus Ducke, Bernd Brüggemann, *Development of an Experimental Multi-robot CBRNE Reconnaissance Demonstrator*.Future Security Proceedings, Springer Berlin.
6. Frank E. Schneider, Dennis Wildermuth and Hans-Ludwig Wolf, *Professional Ground Robotic Competitions From an Educational Perspective*.2012 IEEE 6th International Conference Intelligent Systems.
7. Frank E. Schneider, Dennis Wildermuth and Hans-Ludwig Wolf, *ELROB and EURATHLON: Improving Search & Rescue Robotics through Real-World Robot Competitions*, Proceedings of the 10th International Workshop on Robot Motion and Control, Poznan University of Technology, Poznan, Poland, July 6-8, 2015.

V. Gradetsky, M. Knyazkov, O. Kotova, Eu. Semenov, A. Sukhanov, V. Chashchukhin

PROBLEMS OF ADAPTATION TO SURFACES OF VACUUM CONTACT DEVICES OF ROBOTS

A.Yu. Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of Russian Academy of Sciences (IPMech RAS), Moscow
gradet@ipmnet.ru

Abstarct

The problem of achievement of the best interface of vacuum contact devices with surfaces arises both for manipulators equipped with vacuum captures, and for mobile robots, moving on surfaces of complex shape, with properties unknown in advance. The ways of passive and active adaptation of contact devices, in which generation of vacuum for reliable coupling with surfaces is used, are considered. Because of non-linearity of the consumable and load characteristics of vacuumization, the graphic method of calculation of operating modes is considered.

Keywords: manipulators and mobile robots, vacuum contact device, adaptation to surfaces, non-linear characteristics, graphic method of calculation.

The work was supported by RFBR grant №15-08-04117.

1. Introduction.

Many modern manipulators are equipped with vacuum captures of products with various form of surfaces of contact with capture [1-4]. Mobile robots, in particular the robots moving on difficult surfaces under various corners to the horizon carry out fixing on surfaces by means of vacuum contact devices [5-12].

If quality or a form of surfaces aren't known in advance, then for implementation of reliable coupling there is a need of automatic recognition of properties of a surface and adaptation to them, i.e. applications of ways of adaptation to surfaces. Despite the achieved results, the problem of adaptation of vacuum contact devices to surfaces with properties that are unknown in advance is not completely solved so far and it demands development of new approaches in various directions of researches. One of them is based on development of methods of modeling interaction of vacuum contact devices with surfaces of various quality. A certain contribution in this direction is reflected in work [13] in which results of development of various models and the analysis of use of modeling for estimates of performance indicators of operation of vacuum contact devices are given. The most developed and applied models are discussed: simulation model of system of keeping the robot on a vertical surface, the vacuum system model, as well as the formation of leaks in case of contact with a surface, distribution of cracks on the surface, and control of the translational movement of the robot based on a finite state machine. The consideration is given to statistical modeling the system of keeping the robot on a surface and assessment of its efficiency.

Ways of passive adaptation mainly due to the original designs of contact devices and use of materials with desired elastic and wear-resistant properties and multicellular structure of arrangement of miniature contact devices get development. Background of development of contact devices of different scale robots possessing properties of adaptation to the surfaces which quality was unknown in advance were noted before in many results of researches, for example in [14, 15]. The mobile robots intended for the movement on surfaces arbitrarily oriented in space are of a certain interest. In these cases it is necessary to use methods of passive adaptation.

The paper considers methods of active and passive adaptation that can be used to solve the problem, the nonlinear characteristics of processes of vacuuming in robot contact devices and a graphical representation of

operating modes in vacuum contact devices of manipulators and mobile robots with different systems of vacuum generation.

2. Analysis of passive adaptability to a surface of various quality due to design features of the vacuum contact device.

The external views of robots of vertical movement , step movement and continuous movement with a sliding seal [15] are given in Fig. 1. The arrangement of vacuum contact devices for both cases of realization of the movement of mobile robots is shown.

a) b)

Figure 1 – The external views of robots of vertical movement: a) step movement, b) continuous movement with a sliding seal

It should be noted the most frequently used methods of adaptability to changes of the quality of the surfaces being implemented through the creation of new design solutions. These include use of several rows or matrixes of vacuum elements, materials with the form variable along the surface profile, use of compensating and correcting devices of elastic pliability, including springs, use of effect of phase transition of granulated materials when change of the external action, designing of the sprung multifingered devices and pneumatic bellows drives of low pressure.

Passive adaptation at the expense of constructive solutions is the most widespread, rather reliable, not requiring additional resources of control of the device however requiring inventive innovative approach.

Here are some of the most significant examples.

Autonomous vacuum gripper with a pneumatic pump [2] as its own vacuum source contains a contact device in the form of several rows of pneumatic suction cups each of which has embedded elastic cuffs on edges of contact with a base surface with high frictional and adhesive properties. Internal cavities of the contact device are connected with the high pressure camera through airtight elastic membranes. Similar construction with several rows of pneumatic suction cups, due to the elastic coupling, makes it possible to adapt to dusty, rough and porous surfaces and surfaces of a complex relief with cracks and potholes.

In the modified vacuum contact device of an improved design microrobot it is possible to make regulation of the coefficient of depression of a pneumatic piezo-pump, and by such a way to control an attraction force to a surface of basing, or, in a case of application of vacuum gripper in a manipulator design, to control a force of gripping a detail surface.

The sensing vacuum gripper of details [3] contains a contact suction cup; its cavity is connected via a pneumatic valve with vacuum channel of the ejector connected to the pressure source through the pneumatic valve and the pressure regulator. The casing and the contact suction cup, together with the receiver pipe placed in the cavity coaxially to the contact suction cup, form the pneumatic sensor of indication of position of the detail or the surface inclination. The additional suction cup is established on the loose end of the receiver pipe. The external surface of the additional suction cup forms a ring nozzle with the internal surface of the contact suction cup. The channel of the receiver pipe is connected to atmosphere and through a pneumatic control valve is connected to a cavity with normally closed contacts of the sensor of availability of a detail or of the contact with a surface, and its cavity with normally open contacts is connected to the vacuum channel. The similar design [3] makes it possible to improve the reliability of the contact with the surface.

The contact device of the gripping correcting vacuum module [4] is executed with a sealing element, fixed with a possibility of misalignment and is spring-loaded concerning a midposition. The casing is provided with limiters of level travel, fixed on the perimeter on a sealing element with the possibility of diversion from its contact surface when misalignment of the contact device that as a whole is aimed at increasing the reliability of the contact with a surface with previously unknown features.

Automatic formation of vortex streams for ensuring necessary level of vacuum in devices of contact with surfaces of plane and nonplane forms [8] provides necessary maintaining the depression level in particular limits irrespective of the surface properties.

The given examples illustrate achievement of passive adaptation to surfaces of various properties at the expense of constructive decisions.

3. Graphical representation of operating modes

Because consumable and load characteristics of vacuumization are significantly non-linear, a graphical method of calculation of operating modes based on the experimentally derived consumable characteristics of a flow in the interthrottle chamber composed of two throttles [14] is offered. Fig.2 presents the process of evacuating in the vacuum contact device consisting of capacity in the form of interthrottle camera with throttles D1 and D2, that are in contact respectively with surfaces and the vacuum generator, for example ejector, schematically shown in Fig. 2.

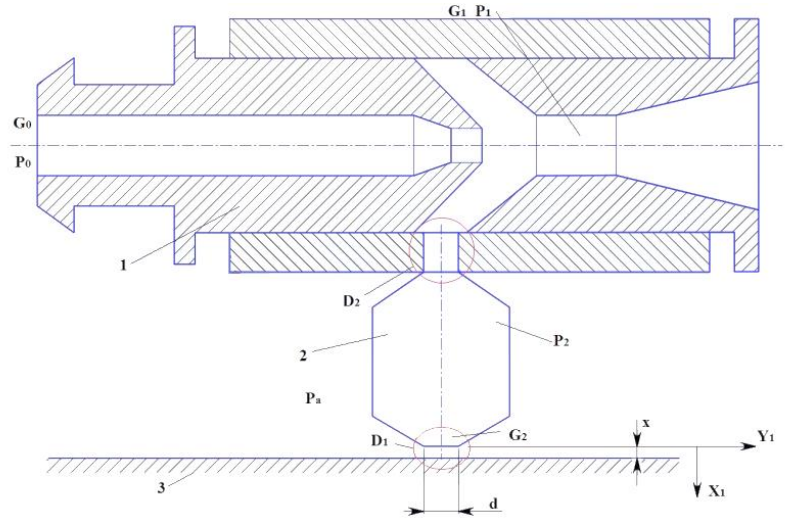


Figure 2 – Scheme of vacuuming a vacuum contact device

1-Vacuum generator – ejector; 2 – pneumatic container – chamber; 3 – surface; D_1 and D_2 – turbulent throttles at outlet and inlet of container of vacuuming an ejector; Pa, P_0, P_1, P_2 - absolute pressures; respectively: atmospheric pressure; supply pressure; pressure at nozzle cut of ejector; pressure in container of vacuuming 2 of contact device.

Here and hereinafter, absolute pressure and mass flow are taken into consideration.

A feeding jet of the ejector at the air consumption – G_0 under pressure P_0 evacuates the air through the throttle D_2, creating depression in container of the contact device. The air comes out the container through the throttle D_2 at the air consumption G_2 and under pressure P_2 which depends on the gap x formed between the throttle D_1 and the surface, and which changes from atmospheric pressure P_a to a meaning of a coefficient of vacuum level within $\alpha=(0,3\div 0,5)P_a$. Air consumption G_1 through the throttle D_1 occurs under changing pressure drop P_a-P_2 depending on gap x. If pressures P_1 and P_2 are specified then the pressure P_2 in the interthrottles chamber can be found, knowing the consumption characteristics of the throttles D_1 and D_2 which were obtained for P_0=const and P_a=const in dependence on P_2 or the ratios $\frac{P_2}{P_a}$ and $\frac{P_a}{P_2}$ and $\frac{G_2}{G_0}$ in dimensionless coordinates. Overlay of throttling characteristics defines the abscissa of the intersection point. This method is essentially reduced to finding a cross point of throttling characteristics that corresponds to equality of air consumption in quasi-static mode through throttles D_1 and D_2. In the dimensionless coordinates the graphic form (Fig. 3) presents dependence of ratio of pressure P_2 in the container to atmospheric pressure P_a on ratio of a size of the current gap x to the maximal gap x_0 at which the required vacuum is achieved, i.e. $\frac{P_2}{P_a} = f_1\left(\frac{x}{x_0}\right)$, at P_a=const, $\alpha P_a \le P_2 \le P_a$, for different values $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_0$ where vacuum level coefficient α=0,3÷0,6. At $x=x_0$ and $P_2=P_a$ the vacuum is absent. The type of throttling characteristics in the dimensionless coordinates through the throttles of D_1 and D_2 is given in Fig. 4a, b respectively. The operating mode (Fig. 4, c) is defined by a cross point of characteristics $\frac{G_2}{G_0} = f_2\left(\frac{P_a}{P_2}\right)$ and $\frac{G_2}{G_0} = f_3\left(\frac{P_2}{P_a}\right)$ respectively.

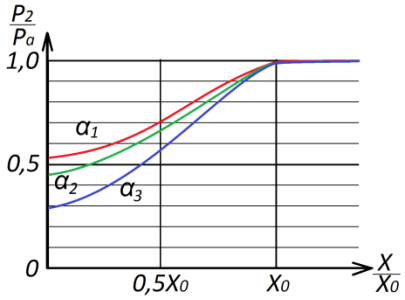


Figure 3 – Dependence of the ratio of pressures in the container of the vacuum contact device on the dimensionless quantity $\frac{x}{x_0}$

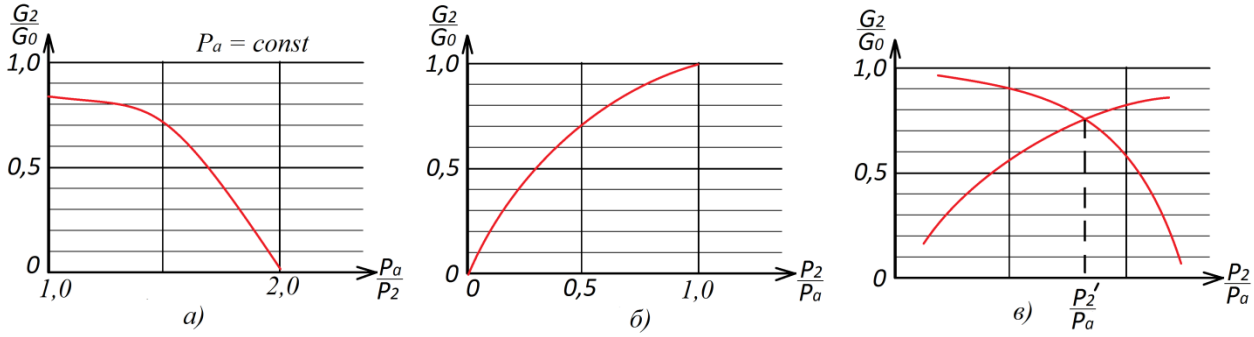


Figure 4 – Throttling characteristics in dimensionless coordinates:
a) Throttling characteristics through throttle D_1;
b) Throttling characteristics through throttle D_2;
c) Finding an operating mode

4. Implementation of the method of active adaptation in the mechatronic control system of a wheeled robot of vertical movement

Method of active adaptation is implemented in the mechatronic control system through the use of the branched information-measuring system including a parameter sensor and a feedback loop designed to form corrective movements.

The adaptive mechatronic control system (Fig. 5) includes a control loop of the wheel movement and a control loop of vacuum level in the chamber of transport module case. On the perimeter of the chamber case a seal is mounted that slides along a vertical or inclined surface during the movement of the robot.

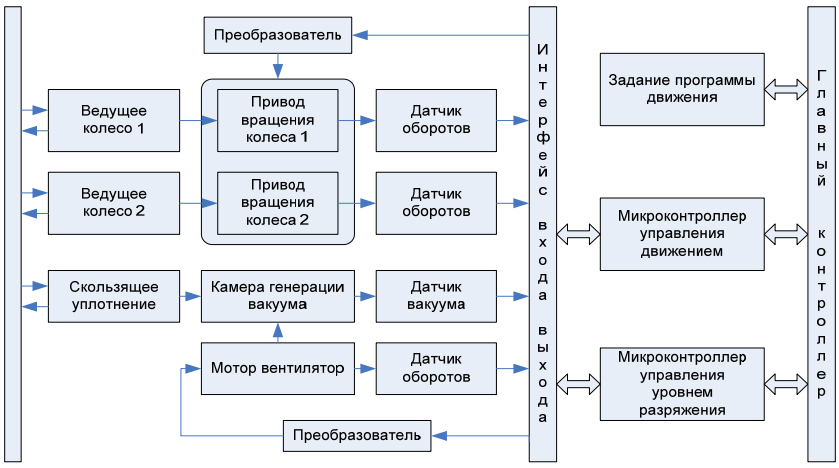


Figure 5 – Structure chart of adaptive control system of mobile robot with a sliding seal

The system (Fig. 5) contains two drives of rotation of wheels 1 and 2, the device of vacuum generation on the basis of the fan-motor in the cavity of the sliding seal, vacuum sensors 4 of rotary speed.

Through the input-output interface the sensors are connected with microprocessors of control of the vacuum level and of the wheel movement. Microprocessors are connected to the main controller forming the program movements. At the beginning, rough and fast movements according to the given program, and then the precise movements with use of feed-backs are realized.

If a robot moves on a horizontal surface, then the control system of vacuum level in the chamber is deactivated. Signal of disable of the system can come from a mounted sensor of a slope angle to the horizon.

The vacuum-level control loop is activated when achieving the critical inclination angle of the movement surface, and it signals about occurrence of the slippage.

Vacuum sensor generates a continuous signal of vacuum level created by the fan in the vacuum chamber of the robot body. The loop of the vacuum-level control, depending on the change of the surface quality or a given program supports the required motor speed of the fan that generates vacuum, and is connected with the control loop via the wheel drives which carry out the movement of the wheels forward, backward, turn to the left or to the right by braking the relevant wheel pairs. Pressing the wheels to the surface occurs due to the force resulting from the difference of pressures in the case chamber and in the environmental atmosphere. The magnitude of this force is an important parameter that provides reliable coupling with the surface and the movement on it without slippage, depending on the changes of surface quality and the wheel speed.

The considered system of vacuum generation in the robot chamber has a feature to adapt to changes of the surface quality and to the different wheel speeds. The adaptation process is implemented by means of a feedback circuit, which includes a vacuum sensor, regulator, vacuum generator. As a result of coordination of interaction with microcontrollers of the movement control system (Fig. 6), the automatic adjustment of vacuum level depending on the change of leaks between the sliding seal and the surface irregularities within certain limits is performed.

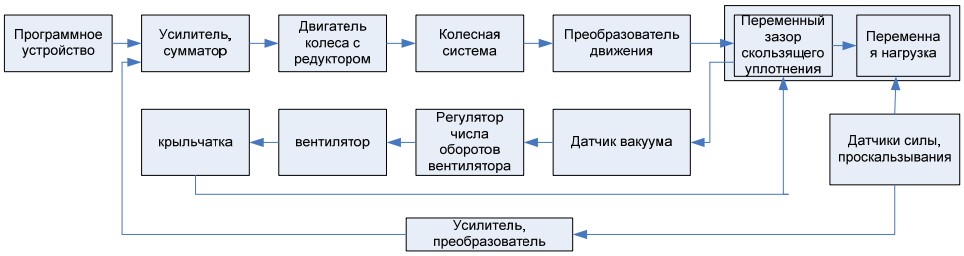


Figure 6 – The scheme of control of a mobile robot with adaptive vacuum device of coupling with a surface

The movement control system is adaptive because of a possibility of correction of the programmed wheel movement depending on random factors of change of environment and surface quality. At the same time the movement of the wheels has to depend on the movement of the sliding seal on a surface with a minimally possible frictional force and on adaptive vacuum level control. Information delivered from the feedback signals about the forces acting to the wheels is required in order to provide the wheel movement with maximal frictional force without slippage on a surface.

Thus, the adaptive control system realizes the maximum allowed friction forces for coupling the wheels with a surface without slippage, and minimal friction forces for a sliding seal, which provides a reliable robot movement on a surface because of presence of the required vacuum level in the chamber of the robot body.

Conclusion

Some ways of passive and active adaptation of contact or gripping devices of mobile robots to ferromagnetic and non-ferromagnetic surfaces are discussed. Vacuum generation is used in the devices for guaranteed coupling with surfaces of previously unknown quality. The graphical method of calculation of operation modes by reason of non-linear type of load and throttling characteristics of vacuuming is considered.

1. ЧерноуськоФ.Л., БолотникН.Н., ГрадецкийВ.Г., Манипуляционныероботы. Динамика, управление, оптимизация. М., «Наука», 1989, 363 с.
2. Даринцев О.В., Мигранов А.Б. Автономное вакуумное захватное устройство микроробота. Патент RU 2266810 C1, №36, 2005 г.
3. Барабанов Г.П., Богданов С.В., Барабанов В.Г. Очувствленный вакуумный захват. Патент RU 2283751 C1, Бюл. №26, 2005 г.
4. Сысоев С.Н., Кузнецов Р.В., Пронин А.В., Александров И.В., Пасечник М.А. Вакуумный захватный корректирующий модуль. Патент RU 2431561 C2. Бюл. №29, 2011 г.
5. Longo D., Muscato G. Adhesion techniques for climbing robots: state of the art and experimental consideration // Proc. of 11th Intern. Conf. on Climbing and Walking Robots (CLAWAR-2008), 08-10 September 2008, Coimbra, Portugal.
6. Luk B., Collie A., Billinngsley J. Robug II: An intelligent wall climbing robot // Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation 1991. Vol. 3 P. 2342-2347.

7. Schmidt D., Berns K., Ohr J. Analysis of sliding suction cups for negative presure adhesion of a robot climbing on concrete walls // Adaptive Mobile Robotics. Proc. of the 15th Int. Conf. on Climbing and Walking Robots (CLAWAR-2012), 23-26 July 2012, Baltimore, USA, P. 813-820.
8. Illingworth L., Reinfeld D. Vortex attractor for planar and non-planar surfaces. U.S.A. Patent 6.619.922, Sept. 16. 2003.
9. Градецкий В.Г. Динамические процессы в миниатюрных мобильных роботах с вакуумным контактом к поверхностям перемещения // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2011. №4. Ч. 2. С. 104-105.
10. Градецкий В.Г., Фомин Л.Ф. Динамические процессы в системах создания вакуума миниатюрных мобильных роботов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2013. № 9. С. 10-14.
11. URL: www.camozzi.com
12. Дмитриев В.Н., Градецкий В.Г. Основы пневмоавтоматики. М.: Машиностроение, 1983. 359 с.
13. Тачков А.А., Калиниченко С.В., Малыхин А.Ю. Моделирование и оценка эффективности системы удержания малогабаритного автономногоробота вертикального перемещения с вакуумными захватами. // Мехатроника, автоматизация, управление. 2016. №3. С. 178-186.
14. Градецкий В.Г., Князьков М.М., Фомин Л.Ф., Чащухин В.Г. Механика миниатюрных роботов. М.:Наука, 2010. 271 с.
15. Градецкий В.Г., Вешников В.Б., Калиниченко С.В., Кравчук Л.Н. Управляемое движение мобильных роботов по произвольно ориентированным в пространстве поверхностям. М.: Наука, 2001. 359 с.

В.Г. Градецкий, М.М. Князьков, О.И. Котова, Е.А. Семенов, А.Н. Суханов, В.Г. Чащухин

ПРОБЛЕМЫ АДАПТАЦИИ ВАКУУМНЫХ КОНТАКТНЫХ УСТРОЙСТВ РОБОТОВ К ПОВЕРХНОСТЯМ

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук (ИПМех РАН), Москва
gradet@ipmnet.ru

Аннотация

Проблема наилучшего сопряжения с поверхностями вакуумных контактных устройств возникает как для манипуляционных роботов, снабженных вакуумными захватами, так и для мобильных роботов, перемещающихся по поверхностям сложной формы с заранее неизвестными свойствами. Рассматриваются способы пассивной и активной адаптации контактных устройств, в которых используется генерация вакуума с целью надежного сцепления с поверхностями. Поскольку расходные и нагрузочные характеристикивакуумированиянелинейны, рассматривается графический метод расчета рабочих режимов.

Ключевые слова: манипуляционный и мобильный роботы, вакуумное контактное устройство, адаптация к поверхностям, нелинейные характеристики, графический метод расчета.

Работа выполнена при поддержке Гранта РФФИ №15-08-04117.

1. Введение

Многие современные манипуляционные роботы снабжены вакуумными захватами изделий с различной формой поверхностей соприкосновения с захватом [1-4]. Мобильные роботы, в частности роботы, перемещающиеся по сложным поверхностям под различными углами к горизонту, осуществляют закрепление на поверхностях посредством вакуумных контактных устройств [5-12].

Если качество или форма поверхностей заранее не известны, то для осуществления надежного сцепления возникает необходимость автоматического распознавания свойств поверхности и приспособления к ним, т.е. применения способов адаптации к поверхностям. Несмотря на достигнутые результаты, проблема адаптации вакуумных контактных устройств к поверхностям с заранее неизвестными свойствами до настоящего времени полностью не решена и требует разработки новых подходов в различных направлениях исследований. Одно из них основывается на развитии методов моделирования взаимодействия вакуумных контактных устройств (вакуумных захватов) с поверхностями различного качества. Определенный вклад в этом направлении отражен в работе [13], в которой приведены результаты разработки различных моделей и анализа использования моделирования для оценок показателей эффективности действия вакуумных контактных устройств. Обсуждаются наиболее развитые и применяемые модели: имитационная модель системы удержания робота на вертикальной поверхности, модели вакуумной системы, а также образования утечек при контакте с поверхностью, распределения трещин на поверхности и управления поступательным движением робота на основе конечного автомата.

Уделено внимание статистическому моделированию системы удержания робота на поверхности и оценка ее эффективности.

Получают развитие способы пассивной адаптации в основном за счет оригинальных решений конструкций устройств контакта и применения материалов с необходимыми упругими и износостойкими свойствами и многоячеистой структурой расположения миниатюрных устройств контакта. Предпосылки для разработки контактных устройств роботов разных масштабов, обладающих свойствами приспособления к поверхностям неизвестного заранее качества, отмечались ранее во многих результатах исследований, например в работах [14, 15]. Определенный интерес представляют мобильные роботы, предназначенные для движения по произвольно ориентированным в пространстве поверхностям. В этих случаях бывает необходимо использование методов и пассивной адаптации.

В настоящей работе рассматриваются способы активной и пассивной адаптации, которые могут использоваться для решения поставленной проблемы, нелинейные характеристики процессов вакуумирования в контактных устройствах роботов и графическое представление рабочих режимов в вакуумных контактных устройствах манипуляционных и мобильных роботов с различными системами генерации вакуума.

2. Анализ пассивной приспособляемости к поверхности различного качества за счет особенностей конструкции вакуумных устройств контакта.

На Рис. 1 приведены внешние виды роботов вертикального перемещения, пошагового перемещения и непрерывного движения со скользящим уплотнением [15]. Показано расположение вакуумных контактных устройств для обоих случаев реализации движения мобильных роботов.

а) б)

Рисунок 1 – Внешний вид роботов вертикального перемещения: а) пошагового перемещения б) непрерывного движения со скользящим уплотнением

Отметим наиболее часто применяемые методы приспособляемости к изменениям качества поверхностей, реализуемые за счет создания новых конструктивных решений. К ним можно отнести использование нескольких рядов или матриц вакуумных элементов, материалов с изменяемой по профилю поверхности формы, применение компенсирующих и корректирующих устройств упругой податливости, в том числе пружин, использование эффекта фазового перехода гранулированных материалов при изменении внешнего воздействия, конструирование подпружиненных многопальцевых устройств и пневматических сильфонных приводов низкого давления.

Пассивная адаптация за счет конструктивных решений является наиболее распространенной, достаточно надежной, не требующей дополнительных средств управления устройством, однако требующим изобретательного инновационного подхода.

Приведем некоторые наиболее значимые примеры.

Автономное вакуумное захватное устройство с собственным источником вакуума в виде пневматического насоса [2] содержит контактное устройство, выполненное в виде нескольких рядов пневматических присосок, у каждой из которых на кромках соприкосновения с поверхностью базирования встроены эластичные манжеты с высоким фрикционными и адгезионными свойствами. Внутренние полости контактного устройства соединены с камерой высокого давления через воздухонепроницаемые упругие мембраны. Подобная конструкция с несколькими рядами пневматических присосок благодаря упругим связям дает возможность адаптироваться к запыленным, шероховатым, пористым, имеющим сложный рельеф поверхностям с трещинами и выбоинами.

В модифицированном вакуумном контактном устройстве микроробота усовершенствованной конструкции возможно производить регулирование коэффициента разрежения пневматического пьезонасоса, таким образом контролировать силу притяжения к поверхности базирования или в случае применения вакуумного захвата в конструкции манипуляционного робота контролировать силу захвата поверхности изделия.

Очувствленный вакуумный захват деталей [3] содержит контактную присоску, полость которой соединена через пневмораспределитель с вакуумным каналом эжектора, подключенного к источнику давления через пневмоклапан и регулятор давления. Корпус и контактная присоска совместно с приемной трубкой, размещенной в полости соосно контактной присоске, образуют пневматический датчик индикации положения детали или наклона поверхности. На незакрепленном конце приемной трубки установлена дополнительная присоска, наружная поверхность которой образует с внутренней поверхностью контактной присоски кольцевое сопло. Канал приемной трубки сообщается с атмосферой и через пневмораспределитель подключен к полости с размыкающими контактами датчика наличия детали или соприкосновения с поверхностью, а его полость с замыкающими контактами соединена с вакуумным каналом. Подобная конструкция [3] позволяет повысить надежность контакта с поверхностью.

В вакуумном захватном корректирующем модуле [4] контактное устройство выполнено с уплотнительным элементом, закреплено с возможностью перекоса и подпружинено относительносреднего положения. Корпус снабжен ограничителями хода рычагов, закрепленных по периметру на уплотнительном элементе с возможностью отведения его от поверхности соприкосновения при перекосах контактного устройства, что в целом направлено на повышение надежности контакта с заранее неизвестными особенностями поверхности.

Автоматическое формирование вихревых потоков для обеспечения необходимого уровня вакуума в устройствах контакта с поверхностями плоской и не плоской формы [8] обеспечивает необходимое поддержание уровня разряжения в определенных пределах независимо от свойств поверхности.

Приведенные примеры иллюстрируют достижение пассивной адаптации к поверхностям различных свойств за счет конструктивных решений.

3. Графическийпредставление рабочих режимов

В связи с тем, что расходные и нагрузочные характеристики вакуумирования существенно нелинейны, предлагается графический метод расчета рабочих режимов, основанный на экспериментальном получении расходных характеристик течения в междроссельной камере, составленной из двух дросселей [14]. Представим процесс вакуумирования в вакуумном контактном устройстве (Рис. 2), состоящим из емкости в виде междроссельной камеры с дросселями D_1 и D_2, контактирующими соответственно с поверхностями и генератором вакуума, например с эжектором, который условно изображен на Рис. 2.

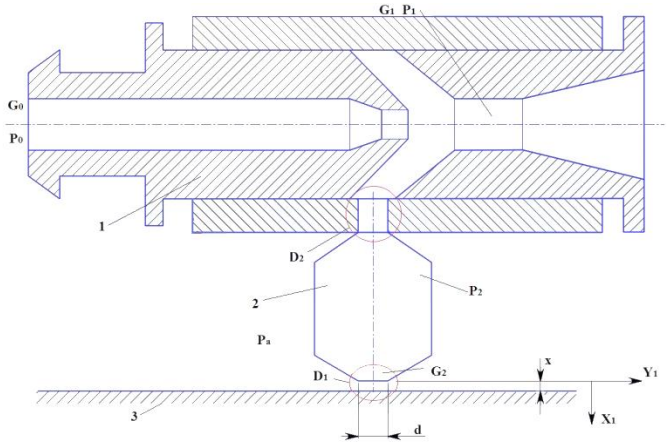


Рисунок 2 – Схема вакуумирования вакуумного контактного устройства

1- Генератор вакуума – эжектор; 2 – пневматическая емкость – камера; 3 – поверхность; D_1иD_2 – турбулентные дроссели на выходе из емкости и на входе емкости вакуумирования эжектора; P_a, P_0, P_1, P_2–абсолютныедавления: соответственноатмосферное, питания, на срезе сопла эжектора, в емкости 2 контактного устройства

Здесь и далее приняты давления абсолютные, расходы массовые.

Питающая струя эжектора с расходом G_0 под давлением P_0 отсасывает из емкости через дроссель D_2 воздух, создавая разрежение в емкости контактного устройства. Из емкости воздух выходит через дроссель D_2 с расходом G_2 под давлением P_2, которое зависит от величины зазора x, образованного между дросселем D_1 и поверхностью, и изменяется от атмосферного давления P_a до некоторой

величины коэффициента степени вакуумаα в пределах $\alpha = (0{,}3 \div 0{,}5)P_a$. Расход воздуха G_1через дроссель D_1 происходит под изменяющимся в зависимости от зазора x перепадом давления P_a-P_2. Если заданы давления P_0 и P_a, то давление в междроссельной камере P_2 можно найти, зная расходные характеристики дросселей D_1и D_2, полученные для P_0=const и P_a=const в зависимости от P_2 или отношений $\frac{P_2}{P_a}$ и $\frac{P_a}{P_2}$ и $\frac{G_2}{G_0}$ в безразмерных координатах. Наложение расходных характеристик определяют абсциссу точки пересечения. Этот способ по существу сводится к нахождению точки пересечения расходных характеристик дросселей, соответствующих равенству расходов в квазистатическом режиме через дроссели D_1 и D_2. В безразмерных координатах графическая форма (Рис. 3) отношения давлений в емкости P_2 к атмосферному давлению P_a от отношения величины текущего зазора x к максимальному зазору x_0, при котором происходит достижение необходимого вакуума, т.е. $\frac{P_2}{P_a} = f_1\left(\frac{x}{x_0}\right)$, при P_a=const, $\alpha P_a \le P_2 \le P_a$, для разных значений $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_0$, где коэффициент степени вакуума $\alpha = 0{,}3 \div 0{,}6$. При $x=x_0 P_2=P_a$, и вакуум отсутствует. Вид расходных характеристик в безразмерных координатах через дроссели D_1и D_2 приведен на Рис. 4а, б соответственно. Рабочий режим (Рис. 4, в) определяется точкой пересечения характеристик $\frac{G_2}{G_0} = f_2\left(\frac{P_a}{P_2}\right)$ и $\frac{G_2}{G_0} = f_3\left(\frac{P_2}{P_a}\right)$ соответственно.

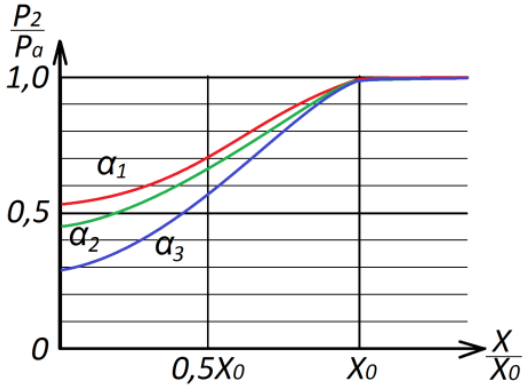


Рисунок 3 – Зависимость отношения давлений в емкости вакуумного контактного устройства от безразмерной величины$\frac{x}{x_0}$

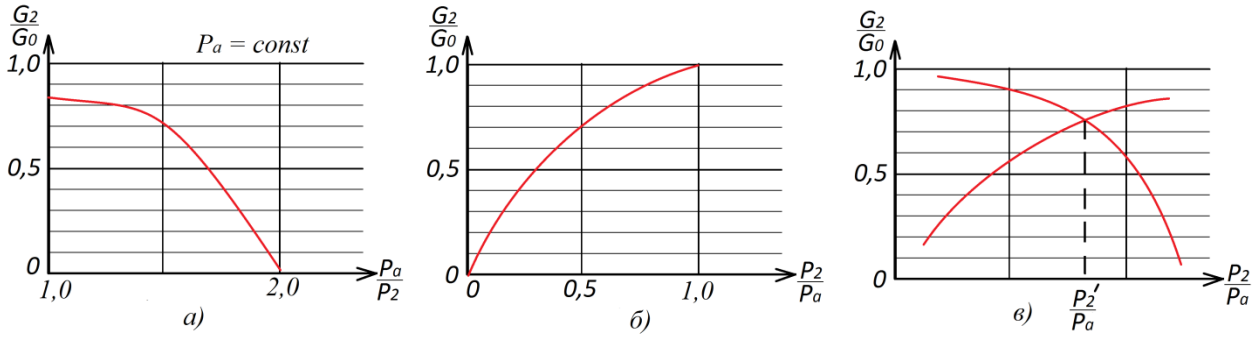


Рисунок 4 – Расходные характеристики в безразмерных координатах
а) Расходные характеристики через дроссель D_1.
б) Расходные характеристики через дроссельD_2.
в) Нахождение рабочего режима

4. Реализация способа активной адаптации в мехатронной системе управления колесным роботом вертикального перемещения

Способ активной адаптации реализуется в мехатронной системе управления за счет применения разветвленной измерительно-информационной системы, включающей датчик параметров и цепи обратной связи, предназначенные для формирования корректирующих движений.

Адаптивная мехатронная система управления (Рис. 5) содержит контур управления движением колес и контур управления степенью разрежения в камере корпуса транспортного модуля. По периметру камеры корпуса смонтировано уплотнение, скользящее по вертикальной или наклонной поверхности во время движения робота.

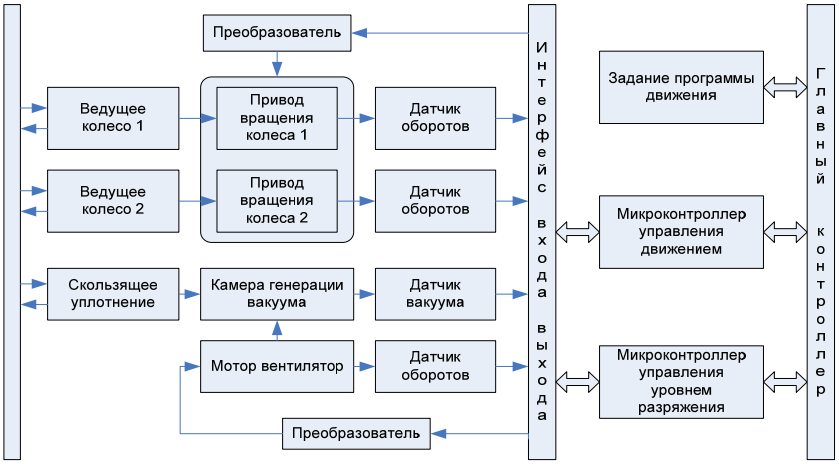


Рисунок 5 – Структурная схема адаптивной системы управления мобильным роботом со скользящим уплотнением

Система (Рис. 5) содержит два привода вращения колес 1 и 2, устройство генерации вакуума на основе мотора-вентилятора в полости скользящего уплотнения, датчики вакуума 4 числа оборотов.

Через интерфейс входа-выхода датчики связаны с микропроцессорами управления уровнем разрежения и управления движением колеса. Микропроцессоры соединены с главным контроллером, формирующим программные движения. Вначале реализуются грубые и быстрые перемещения по заданной программе, а затем точные движения с использованием обратных связей.

Если робот движется по горизонтальной поверхности, то система управления степенью разрежения в камере отключается. Сигнал об отключении этой системы может поступать от установленного датчика угла наклона к горизонту.

Контур управления степенью разрежения включается при достижении критического угла наклона поверхности, по которой происходит движение, сигнализирующего о возникновении проскальзывания.

Датчик вакуума выдает непрерывный сигнал о степени разрежения, создаваемого вентилятором в вакуумной камере корпуса робота. Контур управления степенью разрежения в зависимости от изменения качества поверхности или заданной программы поддерживает необходимое число оборотов мотора вентилятора, генерирующего вакуум, и связан с контуром управления приводами колес, которые осуществляют движение колес вперед, назад, поворот влево или вправо за счет торможения соответствующих колесных пар. Прижим колес к поверхности происходит за счет силы, возникающей в результате разности давлений в камере корпуса и в окружающей атмосфере. Величина этого усилия является важным параметром, обеспечивающим надежное сцепление с поверхностью и движение по ней без проскальзывания, в зависимости от изменения качества поверхности и скорости вращения колес.

Рассматриваемая система генерации разрежения в камере робота обладает свойством адаптации к изменению качества поверхности и к различным скоростям движения колес. Процесс адаптации реализуется посредством цепи обратной связи, в которую включен датчик вакуума, регулятор, генератор вакуума. В результате координационного взаимодействия с микроконтроллерами системы управления движением (Рис. 6) производится автоматическая подстройка степени вакуума к изменению утечек между скользящим уплотнением и неровностями поверхности в определенных пределах.

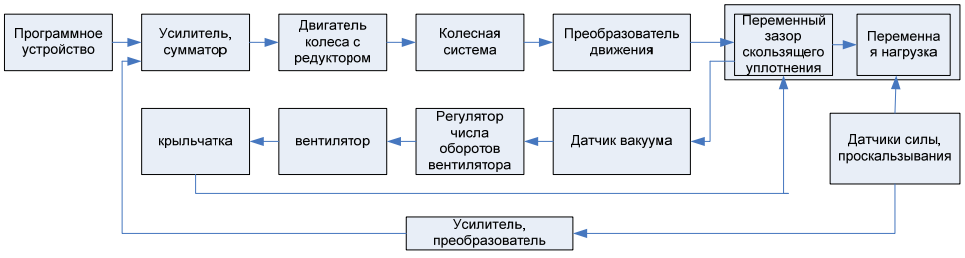


Рисунок 6 – Схема управления мобильным роботом с адаптивным вакуумным устройством сцепления с поверхностью

Система управления движением адаптивна в смысле возможности коррекции программного движения колес в зависимости от случайных факторов изменения окружающей среды и качества

поверхности. При этом движение колес должно зависеть от движения скользящего уплотнения по поверхности с минимально возможной силой трения и от адаптационного управления уровнем разрежения. Информация по сигналам обратной связи о действующих силах на колесах необходима для того, чтобы обеспечить движение колес с максимальной силой трения без проскальзывания по поверхности.

Таким образом, адаптивная система управления реализует максимально допустимые силы трения для сцепления колес с поверхностью без проскальзывания и минимальные силы трения для скользящего уплотнения, что обеспечивает надежное движение робота по поверхности благодаря необходимому уровню разрежения в камере корпуса робота.

Заключение

Обсуждаются некоторые способы пассивной и активной адаптации контактных или захватных устройств мобильных роботов к ферромагнитным и неферромагнитным поверхностям. В устройствах применяется генерация вакуума для гарантированного сцепления с поверхностями неизвестного заранее качества. Рассматривается графический метод расчета рабочих режимов в связи с нелинейным видом нагрузочных и расходных характеристик вакуумирования.

1. Черноусько Ф.Л., Болотник Н.Н., Градецкий В.Г., Манипуляционные роботы. Динамика, управление, оптимизация. М., «Наука», 1989, 363 с.
2. Даринцев О.В., Мигранов А.Б. Автономное вакуумное захватное устройство микроробота. Патент RU 2266810 C1, №36, 2005 г.
3. Барабанов Г.П., Богданов С.В., Барабанов В.Г. Очувствленный вакуумный захват. Патент RU 2283751 C1, Бюл. №26, 2005 г.
4. Сысоев С.Н., Кузнецов Р.В., Пронин А.В., Александров И.В., Пасечник М.А. Вакуумный захватный корректирующий модуль. Патент RU 2431561 C2. Бюл. №29, 2011 г.
5. Longo D., Muscato G. Adhesion techniques for climbing robots: state of the art and experimental consideration // Proc. of 11th Intern. Conf. on Climbing and Walking Robots (CLAWAR-2008), 08-10 September 2008, Coimbra, Portugal.
6. Luk B., Collie A., Billinngsley J. Robug II: An intelligent wall climbing robot // Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation 1991. Vol. 3 P. 2342-2347.
7. Schmidt D., Berns K., Ohr J. Analysis of sliding suction cups for negative presure adhesion of a robot climbing on concrete walls // Adaptive Mobile Robotics. Proc. of the 15th Int. Conf. on Climbing and Walking Robots (CLAWAR-2012), 23-26 July 2012, Baltimore, USA, P. 813-820.
8. Illingworth L., Reinfeld D. Vortex attractor for planar and non-planar surfaces. U.S.A. Patent 6.619.922, Sept. 16. 2003.
9. Градецкий В.Г. Динамические процессы в миниатюрных мобильных роботах с вакуумным контактом к поверхностям перемещения // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2011. №4. Ч. 2. С. 104-105.
10. Градецкий В.Г., Фомин Л.Ф. Динамические процессы в системах создания вакуума миниатюрных мобильных роботов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2013. № 9. С. 10-14.
11. URL: www.camozzi.com
12. Дмитриев В.Н., Градецкий В.Г. Основы пневмоавтоматики. М.: Машиностроение, 1983. 359 с.
13. Тачков А.А., Калиниченко С.В., Малыхин А.Ю. Моделирование и оценка эффективности системы удержания малогабаритного автономногоробота вертикального перемещения с вакуумными захватами. // Мехатроника, автоматизация, управление. 2016. №3. С. 178-186.
14. Градецкий В.Г., Князьков М.М., Фомин Л.Ф., Чащухин В.Г. Механика миниатюрных роботов. М.: Наука, 2010. 271 с.
15. Градецкий В.Г., Вешников В.Б., Калиниченко С.В., Кравчук Л.Н. Управляемое движение мобильных роботов по произвольно ориентированным в пространстве поверхностям. М.: Наука, 2001. 359 с.

V. Gorbunov, F. Kulakov

PROJECT OF VISION SYSTEM FOR THE REMOTE-CONTROLLED SPACE ROBOTS

SPBU, SPIIRAS, Saint-Petersburg, Russia
gorbunov.v93@gmail.com, kufelix@yandex.ru

Abstract

The report proposes an approach to the construction of computer vision systems for space robot. With it reduced to an acceptable level of space robot operation errors caused by the inaccuracy of the ground model

of the environment, which formed a software path for the robot using its ground model. This study was supported by grants RFBR: 13-08-01225 -a, 15-07-04415 -a, 15-01-02021
Keywords: Vision system, computer vision, space robots, remote control.

В.И. Горбунов, Ф.М. Кулаков

СИСТЕМА ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ ТЕЛЕУПРАВЛЯЕМЫХ КОСМИЧЕСКИХ РОБОТОВ

СПбГУ, СПИИРАН, Санкт-Петербург
gorbunov.v93@gmail.com,kufelix@yandex.ru

Аннотация

В докладе предложен подход к построению системы технического зрения для телеуправляемого космического робота. С ее помощью уменьшаются до допустимого уровня возможные ошибки функционирования космического робота, вызванные неточностью наземной модели внешней среды, в которой сформировалась программная траектория для робота с использованием его наземной модели. Данное исследование поддержано грантами РФФИ: 13-08-01225-а, 15-07-04415-а, 15-01-02021-а.

Ключевые слова: техническое зрение, компьютерное зрение, космические роботы, телеуправление, СТЗ.

Введение

Известный подход к организации телеуправления космическим роботом [1] предполагает использование на наземном центре управления космическим роботом модели робота и его внешней среды, а также средств обучения робота, требуемым действиям в космосе. Возможным средством обучения может служить задающая рукоятка с отражением усилий, с помощью которой человек, осуществляя управление моделью робота в копирующем режиме, производит выполнение нужной операции. Траектория изменения в пространстве и времени вектора положения рабочего инструмента модели робота и закон изменения во времени вектора силы взаимодействия инструмента с объектами модели внешней среды могут быть использованы в качестве программных сигналов для локальной системы управления космических роботов. Передача этих сигналов реальному космическому роботу осуществляется после предварительной проверки их действия на модели робота в локальной системе управления, которого, они вводятся в качестве программных значений вместо управляющих сигналов от задающей рукоятки, получаемых во время обучения. В случае достаточной точности наземных моделей, шансы выполнения космическим роботом требуемых действий, при качественной отработке переданных программных сигналов, оказываются достаточно высоки и, следовательно, независимо от величины запаздывания передачи сигнала, задача управления успешно решается. К сожалению, на практике неизбежна неидеальность модели. Это может привести к ошибочному функционированию робота и возможному срыву выполнения требуемой операции. Для уменьшения ошибок до допустимого уровня, наряду с программными сигналами, необходимо формировать и передавать в локальную систему управления космического робота дополнительную информацию. На ее основе, с использованием системы силомоментного очувствления и системы технического зрения космического робота должны быть сформированы сигналы коррекции, которые, в конечном счете, обеспечат успешное функционирование робота. В [2] были разработаны методы, которые корректируют поведение робота в случае, когда модельная среда отличается от реальной достаточно мало, в частности, когда предметы реальной среды незначительно смещены относительно их модельных положений. В данном докладе описан подход к построению системы технического зрения, при котором достигается успешное функционирование робота при значительно большем отличии реальной среды от ее наземной модели.

Существующие методы для детектирования на изображении объектов полученных с помощью СТЗ, установленной на роботе, предполагают поиск характерных точек на изображении объектов. Они требуют воссоздания топографии рабочей зоны робота и базируются на двух подходах: сканирующем – с использованием данных о глубине в каждом пикселе кадра и проецирующем – с использованием меток проецированных на поверхность объекта и расчётом искажений при помощи локационных датчиков и TV камер [3, 4]. Методы выделения на объекте множества характерных точек имеют ряд недостатков: невозможность обозрения точек с невидимых для СТЗ граней объектов, дополнительные затраты вычислительных ресурсов для классификации объектов при большом их количестве. В данной работе

предлагается к рассмотрению новый метод построения системы детектирования объектов с использованием СТЗ.

Постановка задачи

Для взаимодействия робота-манипулятора с объектом сложной формы, необходимо определить координаты полюса объекта (x,y,z) и углы поворота (w,p,r), а также множество допустимых положений рабочего инструмента удобных для взаимодействия с объектом.

Данная задача представима в виде 2 подзадач:

1. Поиск координат (x,y,z) точки, расположенной на объекте и используемой в качестве полюса.
2. Поиск углов поворота объекта (w,p,r) относительно СТЗ, зафиксированной на рабочем инструменте.

Семейство алгоритмов поиска координат точки на объекте

Современные ПЗС-камеры, используемые в СТЗ описываются с помощью модели проективной камеры (см. рисунок 1).

Вектор ОС перпендикулярен матрице камеры ABCD, проходит через точку с – центральную точку матрицы. Зная Ос и координату m на плоскости ABCD, несложно определить углы поворота φ и ψ для нахождения вектора ОМ.

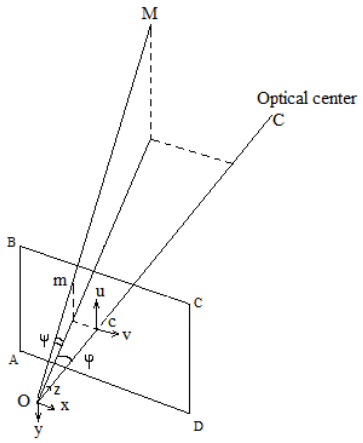


Рисунок 1 – Модель проективной камеры

В поставленной задаче координаты (x, y, z) могут быть найдены по углам поворота φ и ψ, а также длине отрезка Mm, обозначающего расстояние от матрицы камеры до точки M. Для нахождения длины Mm можно воспользоваться одним из методов построения карты глубины изображения по стереопаре: В общем случае, для каждого пикселя левого кадра с координатами (x_0, y_0) выполняется поиск пикселя на правом кадре. Предполагается, что пиксель на правом изображении должен иметь координаты (x_0 — d, y_0), где d — величина смещения. Поиск соответствующего пикселя выполняется путем вычисления максимума функции отклика, в качестве которой может выступать корреляция окрестностей пикселей (см. рисунок 2) [5]. Для левого кадра СТЗ зависимость может быть вычислена по формуле:

$$\frac{T-d}{Z-f} = \frac{T}{Z} \rightarrow Z = \frac{fT}{d}$$, где Z – расстояние до объекта (1)

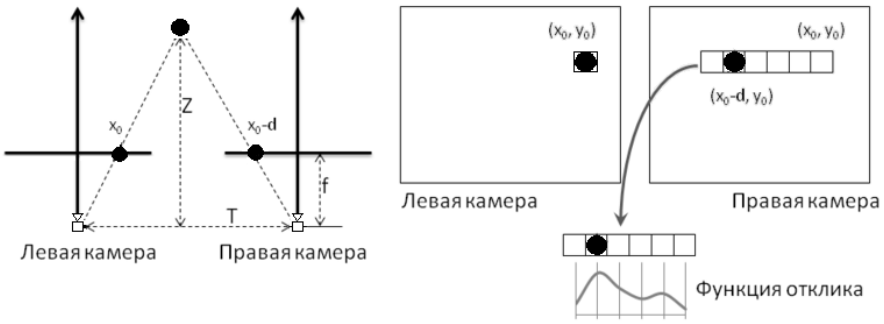


Рисунок 2 – Вычисление карты глубины изображения

Метод поиска углов вращения объекта относительно СТЗ

Для получения углов вращения объекта важной задачей становится поиск и выбор множества реперных точек искомого объекта. Для взаимодействия с объектом сложной формы необходимо ввести унифицированный классификатор, который позволит однозначно определить на любом кадре СТЗ его двумерную проекцию из пространства R3.

В качестве классификатора для комбинированной СТЗ предлагается использование в качестве характерных точек множество точек, принадлежащих границе проекции объекта. В общем случае, в методах, используемых для выделения границ, используется ступенчатый край, сглаженный функцией ошибки (функция Гаусса). Одномерное изображение f, имеющее один край в точке x = 0 в общем случае может быть смоделировано следующим образом:

$$f(x) = \frac{I_r - I_l}{2}\left(\mathrm{erf}\left(\frac{x}{\sqrt{2}\sigma}\right) + 1\right) + I_l \text{ , где } \mathrm{erf}(u) = \frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_0^u e^{-t^2}\,dt,\ I_l = \lim_{n\to-\infty} f(x),\quad I_r = \lim_{n\to\infty} f(x) \quad (2)$$

Использование преобразования изображения, отображающего границу объекта, позволяет создать отпечаток объекта для заданного угла вращения, с точностью до симметрии граней.

Рассмотрим двумерную матрицу изображений Mat = [N*N] (широта, долгота в сферических координатах), составленную из изображений, полученных с ПЗС-камеры, расположенной на поверхности сферы с радиусом R (см. рисунок 3). Оптический центр камеры пересекает центр полусферы с расположенном в нем объекте. Таким образом, матрица камеры ABCD лежит в касательной поверхности к сфере в точке расположения камеры. Снимки с камеры сделаны с шагом (180/N)°. От выбора N зависит точность модели.

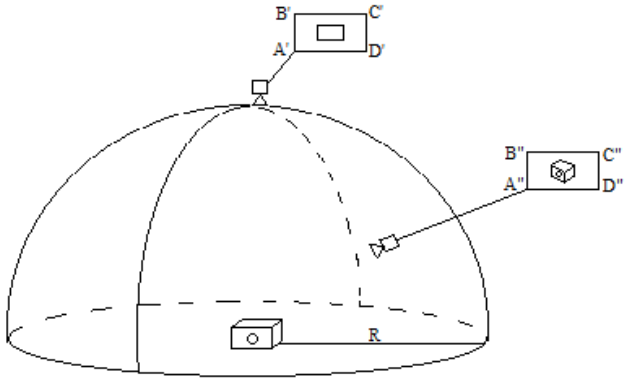


Рисунок 3 – Захват изображения объекта с СТЗ

Таким образом, если принять систему координат объекта, где центр объекта расположен в начале координат, то положения камеры для заполнения матрицы Mat можно рассчитать следующим образом: Углы вращения можно получить с помощью вектора нормали $(-x_0,\ -y_0,\ -z_0)$ при переходе от системы координат объекта к декартовым координатам робота. Положение камеры в пространстве может быть рассчитано по формуле:

$$\begin{cases} x_M = Rsin(\theta)\cos(\eta) \\ y_M = Rsin(\theta)\sin(\eta) \\ z_M = Rsin(\theta) \end{cases} \quad (3)$$

Для избегания уплотнения снимков в сферических координатах для заполнения Mat, для заданной точности (180/N)° по формуле расчёта длины хорд, расположенных под углом α, параллельно к диаметру, $S = R\,cos\alpha$, где S – длина хорды, R – радиус окружности, получим $N * cos\alpha = K$, где N – размерность Mat, K – количество элементов в строке, соответствующей индексу $\theta = \alpha$.

Для упрощения модели предлагается в случае уплотнения шага снимков в 2 раза, соответствующие элементы Mat оставлять пустыми.

- $\theta = [0°, 60°]$ - Заполнение каждого элемента строки Mat.
- $\theta = (60°, 75°]$ - Заполнение каждого второго элемента строки Mat.
- $\theta = (75°, 83°]$ - Заполнение каждого четвертого элемента строки Mat.
- $\theta = (83°, 87°]$ - Заполнение каждого восьмого элемента строки Mat.

Таким образом, можно получить двумерный массив Mat, состоящий из бинарных изображений, обозначающих края объектов видимой сцены камеры СТЗ, для которой углы θ, η соответствуют строкам и столбцам. Для заполнения Mat возможно использование рендеринга CAD-модели объекта с обработкой детектором выделения границ.

Алгоритм детектирования объекта и расчёт его координат для СТЗ

1) Делаем снимок камеры СТЗ.
2) Строим карту глубины изображения.
3) Получаем бинарное изображение границ объектов.
4) По маске, определяющей границы, с учетом карты глубины изображения и масштабирования границ ищем множество точек, принадлежащее объекту из Mat. Заполняем матрицу Mat1 вероятностями совпадения, соответствующими элементам Mat.
5) Ищем в Mat1 наибольший элемент, выбираем соответствующий ему элемент Mat.
6) Получаем φ и ψ, расстояние до объекта с карты глубины изображения (до точки, являющейся центром объекта).
7) В Декартовых координатах переходим от рабочего инструмента к камере СТЗ.
8) Находим координаты точки M по углам θ, η и расстоянию с карты глубины для точки, лежащей на объекте.
9) В массиве N*N находим положение, обозначенное флагом «Позиция камеры для взаимодействия с объектом», получаем ее координату θ', η'.
10) Находим декартову координату «Позиция камеры для взаимодействия с объектом» из уравнения 3 и пункта 6.
11) Строим оптимальное движение из текущей позиции рабочего инструмента в позицию для взаимодействия с объектом.

Заключение

В данной работе рассмотрен метод для детектирования объекта на изображении камеры системы технического зрения с помощью вероятностного подхода совпадения маски изображения с массивом изображений, соответствующих заданным углам поворота объекта. В настоящее время рассмотренный в докладе метод построения СТЗ для телеуправляемого космического робота программно и аппаратно реализован в действующий прототип (см. рисунок 4). Первые эксперименты показали обнадеживающие результаты.

Рисунок 4 – Прототип СТЗ для телеуправляемого космического робота

1. Кулаков Ф.М.,Телеуправление космическими роботами // Изв. РАН. ТиСУ. 2016. № 4.
2. Кулаков Ф.М., Копирующее и супервизорное управление роботами при большом запаздывании сигналов управления и обратной связи. Часть I // Робототехника и техническая кибернетика. 2016. № 1 (10). С. 55-61.
3. C. Je, S. W. Lee, and R.H. Park. Colour-Stripe Permutation Pattern for Rapid Structured-Light Range Imaging // Optics Communications, Volume 285, Issue 9, pp. 2320-2331, May, 2012.
4. W. Jang, C. Je, Y. Seo, and S. W. Lee. Structured-Light Stereo: Comparative Analysis and Integration of Structured-Light and Active Stereo for Measuring Dynamic Shape // Optics and Lasers in Engineering, Volume 51, Issue 11, pp. 1255-1264, November, 2013.
5. L. Nalpantidis, GC Sirakoulis, A. Gasteratos. Review of stereo vision algorithms: from software to hardware // International Journal of Optomechatronics, pp. 435–462, 2008.

A.Yu. Malykhin, S.V. Kalinichenko, A.A. Tachkov, A.G. Volkov

SIMULATION MODEL OF ADHESION SYSTEM OF WALL-CLIMBING ROBOT WITH VACUUM CUPS

Research and training center «Robotechnics», Bauman Moscow State Technical University
mo_lex@mail.ru

Abstract

The mechanisms of a wall-climbing robot walking robot (WCWR) include two functions: “attachment” and “locomotion” parts. There are many factors affected on these processes, one of them is an adhesion method. A miniature mobile WCWR with suction cups and on-board vacuum pump with additional vacuum tank is discussed. The paper describes the complex simulation model of suction cup’s adhesion to rough surfaces, which is able to be used for WCWR’s conceptual design. The model is based on statistical characteristics of vertical surfaces, statistical characteristics of cracks and on the analysis of interaction between adhesion system and surface. The simulation model is used to select the basic parameters of adhesion system such as the pump capacity, vacuum tank volume by the Monte-Carlo method. The effectiveness of the robot adhesion system is evaluated with the help of this model. Application of the simulation model is explained an example. We have evaluated the effectiveness of vacuum tank by the number of robot steps. The results of adhesion system simulation are cited. In addition, we have determined the distribution law of the robot’s locomotion before it stops. The simulation results are revealed that the distribution of the total number of steps is subject to gamma-distribution. If we consider only the steps subsequent to the first successful, their distribution has exponential probability law. A promising application of the developed model is to determine the optimal design of vacuum grippers for multilink wall-climbing robots.

А.Ю. Малыхин, С.В. Калиниченко, А.А. Тачков, А.Г. Волков

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ УДЕРЖАНИЯ РОБОТА ВЕРТИКАЛЬНОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ С ВАКУУМНЫМИ ЗАХВАТАМИ

НУЦ «Робототехника», МГТУ им. Н.Э.Баумана
mo_lex@mail.ru

Аннотация

Статья посвящена описанию имитационной модели системы удержания робота вертикального перемещения. Данная модель позволяет оценивать утечки вакуума, возникающие в месте контакта вакуумного захвата с поверхностью и обоснованно определять проектные параметры системы. Основными вероятностными параметрами, учитывающими стохастический характер реальной поверхности, являются распределение микронеровностей в месте контакта и распределение трещин по поверхности перемещения. Имитационная модель реализована в среде Matlab Simulink. С помощью разработанной модели показана эффективность применения ресивера в составе системы создания вакуума, и обоснован его минимальный объем. Также установлено, что распределение количества шагов по вертикальной поверхности до остановки подчиняется гамма-распределению. В случае если рассматриваются только шаги, последующие за первым, то их распределение – экспоненциальное. Это позволило сделать вывод, что при проектировании мобильных роботов и их систем управления, обосновано применение прикладной теории марковских случайных процессов. Перспективным применением разработанной модели является определение оптимального варианта построения вакуумных захватных устройств для многозвенных роботов вертикального перемещения.

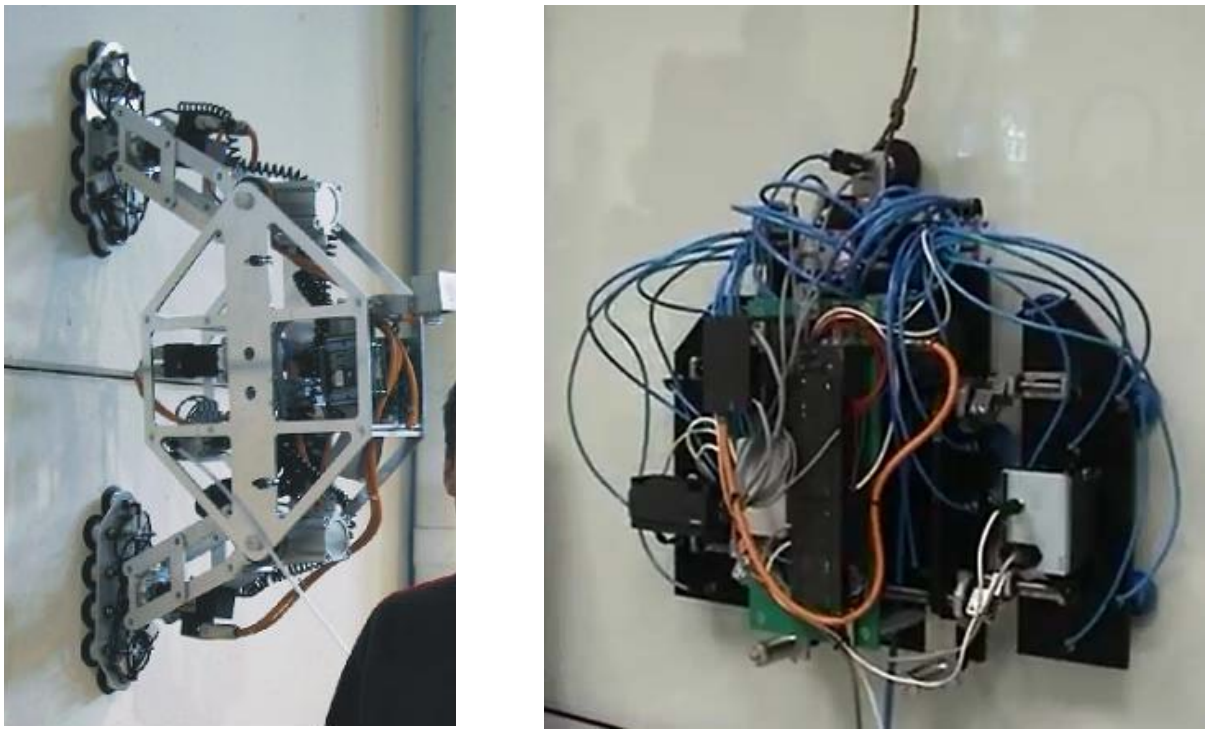
Ключевые слова: имитационная модель, эффективность, захватное устройство, многозвенный робот вертикального перемещения.

Введение

Задача надежного (без отрыва) движения по вертикальным неферромагнитным поверхностям для малогабаритных мобильных автономных роботов, использующих шагающий принцип перемещения с поочередным контактом одной из групп вакуумных захватов (рис.1) является важной и актуальной с точки зрения их практического применения. Проблема удержания связана с тем, что реальные поверхности, по которым совершается перемещение, обладают кривизной, имеют местные неровности, трещины, что приводит к неплотному прилеганию вакуумных захватов к поверхности, натеканию наружного воздуха и, как следствие, к потере контакта захвата робота с поверхностью. В связи с этим качество системы удержания автономных роботов вертикального перемещения (РВП) требуется определять еще до

изготовления опытных образцов и проведения трудоемких натурных испытаний – на стадии проектирования.

По этой же причине широкое применение находит метод исследования качества проектируемой системы на ее математической модели. В настоящей работе авторами представлен комплекс математических моделей, позволяющих имитировать работу системы удержания РВП и определять ее вероятностные характеристики, например, закон распределения шагов, сделанных роботом до первой остановки, вероятность отрыва и т.п. Поскольку система удержания связана с системой перемещения РВП, для определенности далее в качестве РВП будет рассматриваться конструкция (рис.1б), состоящая из двух боковых модулей и одного центрального модуля поступательного движения, оснащенных вакуумными захватами. Особенностью данной конструкции является перемещение с постоянным шагом, что облегчает моделирование и интерпретацию результатов [1]. Боковые и центральный модули оснащены вакуумными насосами и опционально дополнительными вакуумными ресиверами, компенсирующими натекание наружного воздуха в местах возникновения неплотного контакта вакуумного захвата с поверхностью.



а) б)

Рисунок 1 – Малогабаритные роботы вертикального перемещения (а – RAMR1 (США), б – экспериментальный робот (Чехия)

Описание комплекса используемых моделей

В рамках рассматриваемой модели системы удержания можно выделить следующие ее составляющие (рис.2): термодинамическая модель системы стабилизации давления в ресиверах модулей поступательного движения; термодинамическая модель изменения давлений в полостях вакуумных захватов (ВЗ) в зависимости от величины утечки между уплотнительным контуром захвата и поверхностью движения; статистическая модель формирования утечки в зависимости от местных дефектов поверхности на текущем шаге робота; статистическая модель распределения трещин на поверхности движения; модель формирования шагов робота на основе конечного автомата и логическая модель управления остановкой численного эксперимента при возникновении отрыва робота или выполнения максимально возможного количества шагов, заданного на этапе инициализации модели.

Все перечисленные модели объединены между собой и позволяют проводить статистическое имитационное моделирование перемещения робота по статистически однородной поверхности.

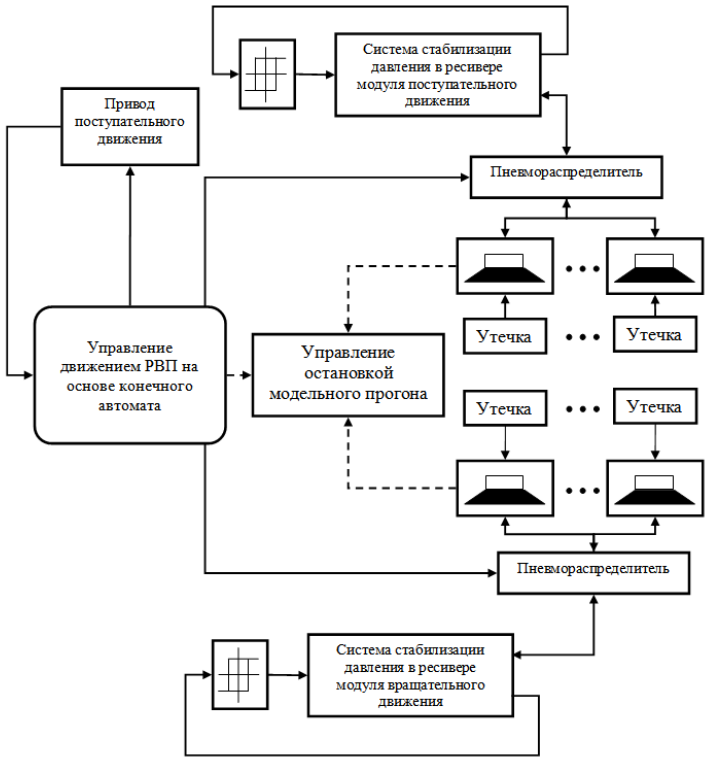


Рисунок 2 – Общая структура модели системы удержания

Подробное описание моделей приведено в работе [1], в настоящей работе приведено ее сокращенное описание.

Изменение давления в полости отдельного вакуумного захвата, можно представить уравнением (1):

$$\dot{p} = \frac{\dot{V}_{\text{П}}}{V_{\text{П}}}\left(kRT\rho - p\right), \tag{1}$$

где $\dot{V}_{\text{П}} = q_{\text{ут}} - \upsilon \cdot S_{\text{сеч}}$, $q_{\text{ут}}$ – объемный расход натекающего воздуха в полость захвата, $S_{\text{сеч}}$ – площадь проходного сечения пневмораспределителя, соединяющего захват с вакуумным ресивером, $\upsilon = \sqrt{\frac{2RT\left|p_{\text{р}} - p\right|}{p}}$ – скорость истечения вакуума из ресивера в захват, $p_{\text{р}}$ – давление в ресивере, R – газовая постоянная, Скорость истечения υ ограничена критической скоростью $\upsilon_{\max} = \sqrt{\frac{2kRT}{k+1}}$.

Изменение давления $p_{\text{р}}$ в ресивере объемом V, создаваемое вакуумным насосом с расходной характеристикой $q(p)$, описывается нелинейным дифференциальным уравнением (2):

$$\dot{p}_p = -\frac{p_p q\left(p\right)}{V}. \tag{2}$$

Модель вакуумной системы, базирующая на уравнениях (1)-(2), для одного вакуумного захвата в виде структурной схемы представлена на рис.3а. Давление в ресивере поддерживается с помощью вакуумных насосов в количестве N штук, за включение которых отвечает релейный регулятор, поддерживающий заданное давление. Модель блока «вакуумный насос и ресивер» в виде структурной схемы приведена рис.3в. Здесь в качестве возмущающего воздействия Q выступает расход вакуума через пневмораспределитель, возникающий из-за разности давлений в ресивере и захвате. Модель распределителя (рис.3б) работает следующим образом: в исходном состоянии вакуумный захват соединен с атмосферой и отсоединен от ресивера, который работает автономно. При подаче управляющего воздействия «Упр.» на пневмораспределитель в момент закрепления ВЗ к поверхности происходит переключение канала захвата на ресивер, при этом модель имитирует возникающий поток натекающего из захвата в ресивер воздуха с расходом $Q_{\text{вых}}$. Апериодический характер изменения давления $p_{\text{вых}}$ и расхода $Q_{\text{вых}}$ в канале «ресивер-ВЗ» учтен в виде инерционных звеньев. Процесс изменения давления в полости захвата моделируется структурной схемой (рис.3г) в соответствии с уравнением (1).

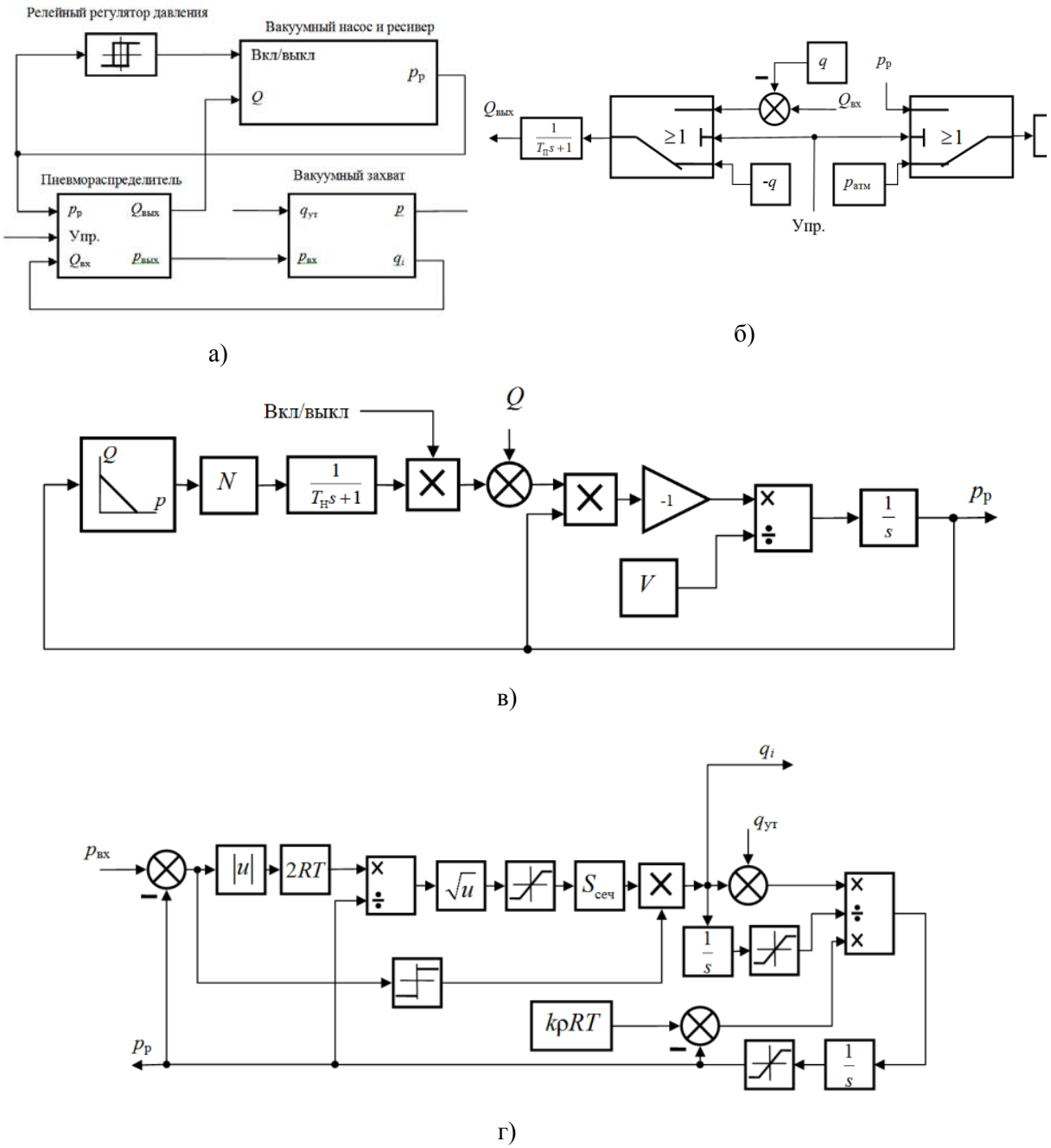


Рисунок 3 – Структурные схемы модели вакуумной системы (а – общая модель, б – модель пневмораспределителя, в – модель системы стабилизации давления в ресивере, г – модель вакуумного захвата)

Для нескольких вакуумных захватов, подключенных параллельно к ресиверу через общий коллектор (рис.2), суммарный расход $Q_{вых}$ определяется как алгебраическая сумма утечек q_i каждого из захватов.

В качестве модели образования утечки в месте контакта ВЗ с поверхностью, авторами разработана оригинальная модель, объединившая «щелевую модель протекания» [2] и статистический закон распределения местных неровностей поверхности. Щелевая модель основывается на механике контактного взаимодействий плоских волнистых поверхностей (рис.4), одна из которых (уплотнительный контур захвата) деформируема. В качестве допущения принимается условие, что утечка происходит в радиальном направлении между волнами.

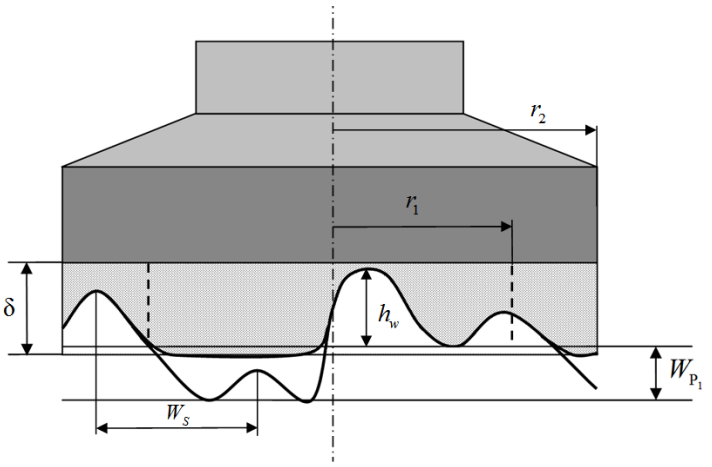


Рисунок 4 – Контактное взаимодействие двух поверхностей

В качестве модели волнистой поверхности принимается набор радиально расположенных волн, имеющих в верхней части цилиндрическую форму. Число волн определяется выражением $n_w = \pi(r_1 + r_2)/W_S$, где r_1 – внутренний радиус захвата до контурного уплотнителя, r_2 – радиус захвата, W_S – длина волны. Учитывается случайный разброс амплитуд волн.

При приложении сжимающей силы $F=F_0+\Delta pS$, происходит деформация поверхности и образуется зазор h, определяемый выражением (3) [3]:

$$h = W_{P_1} + W_{P_2} + h_w - \delta, h \geq 0 \qquad (3)$$

где F_0 – начальная сила прижатия, например, сила тяжести, Δp – разность давлений между атмосферным и давлением внутри полости захвата, S – его эффективная площадь, W_{P_1} и W_{P_2} – высоты сглаженного профиля поверхности и уплотнительного контура соответственно, h_w – высота волны, δ – деформация контакта.

Деформация δ в выражении (3) определяется следующим выражением [2]:

$$\delta = \frac{F}{L}(\lambda_1 + \lambda_2)\left(\ln\left(\frac{L^3}{4F \cdot r_w \cdot (\lambda_1 + \lambda_2)}\right) + 2{,}38629\right), \quad \delta < \varepsilon \cdot h_{упл}$$

где L – длина линии контакта ($L=r_1 - r_2$), $\lambda_i = \left(1-\mu_i^2\right)/(\pi E_i)$, $i = \overline{1,2}$, μ – модуль Пуассона, E – модуль Юнга, r_w – радиус волны, ε – относительная остаточная деформация уплотнительного материала.

Площадь утечки оценивается следующим образом $S_{ут} = W_S \sum_{i=1}^{n_w} h_i$. По оцененному значению $S_{ут}$ рассчитывается объемный расход утечки $q_{ут}=\upsilon \cdot S_{ут}$ по аналогии с описание модели, представленной на рис.3. Таким образом, происходит замыкание термодинамической модели вакуумной системы, описывающей взаимодействие РВП с внешней средой (захватов с поверхностью перемещения).

В модели авторами использовался логнормальный закон распределения высоты отдельных волн. Для моделирования локальной неровности поверхности с получением случайного результата в соответствии с заданным законом распределения, или другими словами «розыгрыша», вся поверхность разбивается на квадратные ячейки с ребром d, для каждой из которых разыгрывается свое значение площади утечки $S_{ут}$. Моделирование распределения трещин на поверхности движения осуществляется в соответствии с формулами и алгоритмом, описанным в работе [1].

Моделирование процесса пошагового движения робота по поверхности реализовано на основе конечного автомата, в котором выделено 10 состояний, в которых пребывает РВП (рис.5). Название состояний приведено на рисунке. Переходы между состояниями записаны условно, и их полная расшифровка в настоящей работе не приводится. В качестве примера, можно указать, что условие перехода x_{6_1} имеет полную форму записи «если давление в расположенных слева ВЗ модуля поступательного движения выше 90 кПа и давление в захватах, расположенных справа, выше 90 кПа (ВЗ «отлипли» от поверхности движения), условие перехода x_{8_1} – «если давление в ВЗ модуля вращения выше 90 кПа и прошло более 1 секунды», а условие $x_{8_1_1}$ – «назад сделано два шага».

Маленькими кружками на рис.5 в соответствии с нотацией диаграмм состояний Харела обозначено ветвление сложных вложенных условий.

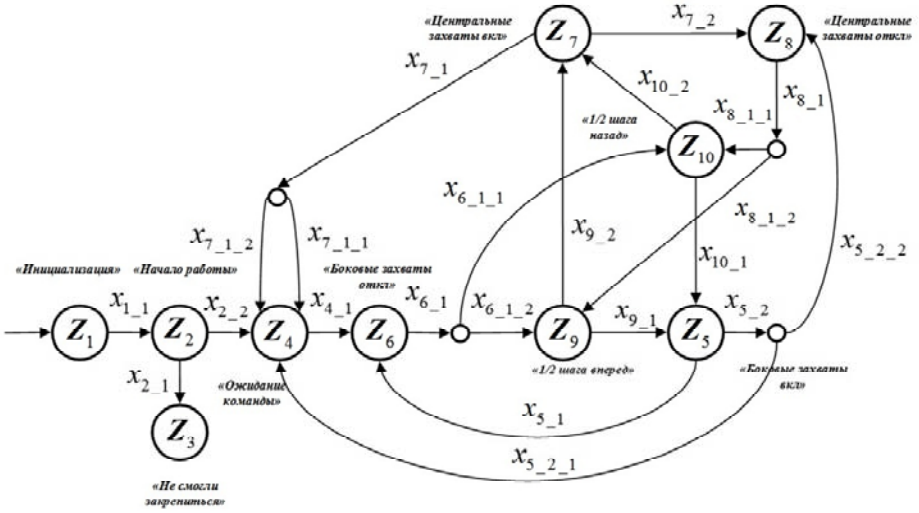


Рисунок 5 – Диаграмма состояний при формировании движения РВП

Логическая модель управления остановкой одной реализации численного эксперимента, например, в случае отрыва робота, реализована на моделях *R-S* триггеров. Адекватность имитационной модели решалась на основе ее структурно-функционального подобия реальным подсистемам РВП и калибровки частных моделей, результаты которой приведены в работе [1].

С помощью данной модели, реализованной в Matlab, проведено статистическое имитационное моделирование движения малогабаритного РВП по ряду различных статистически неоднородных (шероховатых) поверхностей. По результатам использования описанной модели удалось установить, что закон распределения шагов робота до первой остановки подчиняется гамма-распределению. При этом эффективность движения РВП, показателем которой является среднее число успешно сделанных шагов, при использовании бортовых ресиверов выше по сравнению со схемой без ресивера.

Перспективным применением разработанной модели системы удержания роботов вертикального перемещения является проверка качественных возможностей разработанного в НУЦ «Робототехника» многозвенного шагающего робота совместно с алгоритмами движения [4] при его перемещении по различным типам поверхностей. В дальнейшем это позволит определить оптимальный вариант построения вакуумных захватных устройств [5], обеспечивающий выполнение поставленной перед роботом задачи.

1 Моделирование и оценка эффективности системы удержания малогабаритного автономного робота вертикального перемещения с вакуумными захватами / А.А. Тачков, С.В. Калиниченко, А.Ю. Малыхин // Мехатроника, автоматизация и управление, 2016, № 3 Т.17, С. 178 – 186, DOI: 10.17587/mau/17.178-186.

2 Механика контактного взаимодействия плоских волнистых поверхностей / В.П. Тихомиров и др.// Вестник Брянского государственного технического университета, 2013, №4(40), С. 87 – 94.

3 Чаплыгин С.А. Контактное взаимодействие в уплотнительных устройствах // Механика и физика процессов поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования: межвузовский сбор. науч. трудов, вып.6. Тверь: ТвГТУ, 2013, С. 114 – 124.

4 Малыхин А.Ю. Типовые движения многозвенного робота для перемещения по произвольно ориентированным плоскостям // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, серия «Приборостроение», 2012, специальный выпуск №6, С. 148-157.

5 Совершенствование вакуумных захватов для вертикально-перемещающихся робототехнических устройств / С.В. Калиниченко, А.Ю. Малыхин, А.И. Шокин // Материалы XX Международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника. Нано-микро- и микророботы» (ЭР-2009). –Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009. – С. 332-334.

A.G. Leskov, S.D. Moroshkin

COMPUTER VISION SYSTEM FOR OBJECTS POSE ESTIMATION

Dmitrov branch of BMSTU
c8.df.mgtu@gmail.com

А.Г. Лесков, С.Д. Морошкин

СИСТЕМА ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАСПОЛОЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ

ДФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Дмитров
c8.df.mgtu@gmail.com

Введение

Системы технического зрения (СТЗ) являются важным компонентом робототехнических систем. В манипуляционных системах СТЗ используются для обзора рабочей зоны, классификации и детектирования объектов манипулирования, а также оценки их местоположения.

Существует широкий спектр алгоритмов и технологий, лежащих в основе систем технического зрения. Например, в качестве датчиков могут использоваться 2D-камеры [1], сенсоры глубины со структурной подсветкой или лазерные дальномеры [2].

Предлагаемая система технического зрения предназначена для формирования математического представления об объектах манипулирования (ОМ), находящихся в рабочей зоне, пространственном положении этих объектов, а также для формирования карты препятствий.

В основе предлагаемой СТЗ лежат сенсоры глубины семейства PrimeSense - это датчики ASUS Xtion Pro Live и Microsoft Xbox Kinect 360. Они позволяют получать не только плоское цветное изображение, но также строить облако точек (ОТ) видимой части сцены. Облако точек представляет собой набор точек, определяемых пространственными координатами x, y и z в системе координат (СК) сенсора, а также значениями цветовых каналов в кодировке RGB.

Программно система технического зрения состоит из драйверов сенсоров, отвечающих за прием данных и формирование облаков точек, программ, реализующих алгоритмы режимов работы системы, а также базы данных (БД), в которой хранятся математические модели объектов.

п.п Алгоритмы работы системы

Основной задачей представленной СТЗ является определение пространственного расположения объектов манипулирования относительно системы координат сенсора (камеры). Под объектом манипулирования будем понимать объекты, для которых имеется трехмерная модель, а габаритные размеры не превышают 300 мм. Тогда работу системы можно разделить на три составляющих:

1. Формирование математической модели ОМ (обучение).
2. Выбор оператором ОМ в рабочей зоне.
3. Оценка пространственного положения объекта (детектирование).

Формирования математических моделей ОМ (обучения)

В режиме обучения выполняется формирование системой математической модели объекта, как некоторого упорядоченного набора данных, определяющего внутреннее представление объекта в СТЗ, и использующееся в дальнейшем для оценки расположения объекта.

Для имеющейся трехмерной модели формируются ее локальные виды. Локальный вид представляет собой такое облако точек, которое видел бы сенсор СТЗ, «смотря» на объект с определенного ракурса. Для их получения вокруг модели строится сфера, которая разбивается на n равных треугольников. Глубина разбивки n устанавливается оператором, в представленной СТЗ n = 80. В центр каждого треугольника устанавливается виртуальная камера, ее «взгляд» направляется в начало СК объекта и формируется локальный вид объекта. Облако точек, представляющее локальный вид, а также координаты установки камеры относительно СК объекта записываются в базу данных. Так формируется набор из n локальных видов модели объекта.

После производится расчет OUR-CVFH-дескрипторов [3] для каждого из локальных видов. OUR-CVFH дескриптор – алгоритм, описывающий облако точек локального вида гистограммой, состоящей из 308 элементов. Первые 139 элементов кодируют распределение направлений нормалей, построенных для каждой точки из облака. Следующие 104 элемента кодируют распределение точек по квадрантам относительно специальной системы координат, называемой SGURF - Semi-Global Unique Reference Frame (полуглоабльная уникальная система координат), положение которой также

рассчитывается в дескрипторе. Последние 64 элемента массива кодируют направление «взгляда» камеры на облако точек. На рисунке 1 справа показан локальный вид объекта, а также расположенная на нем СК SGURF. Слева показана гистограмма OUR-CVFH дескриптора. Красным обозначены элементы, кодирующие направления нормалей, зеленым – кодирующие распределение точек, а синим – направление «взгляда» камеры.

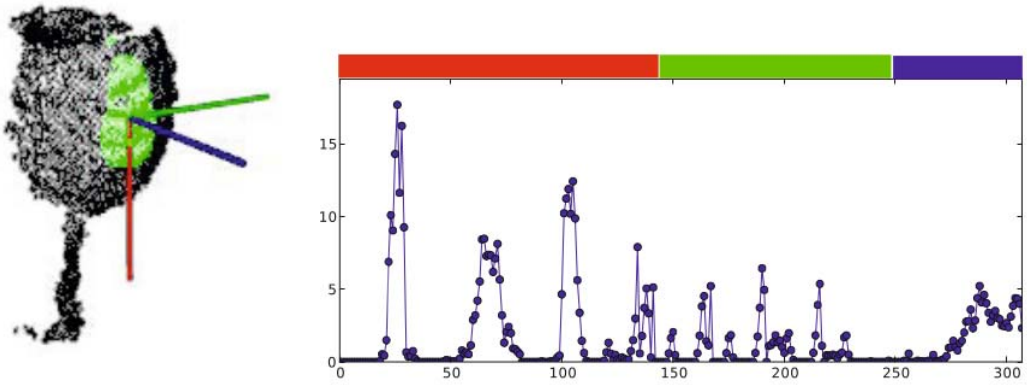


Рисунок 1 – OUR-CVFH-гистограмма для «гладкой» области облака точек

Каждой гистограмме в соответствие ставится матрица 4x4 с координатами установки камеры и матрица 4x4 расположения СК SGURF. Этот набор данных записывается в базу данных под определенным номером, указывающим на номер локального вида.

Сформированная таким образом математическая модель объекта представляет собой упорядоченный набор данных, состоящий из OUR-CVFH-гистограмм и прикрепленных к каждой гистограмме двух матриц 4x4, определяющих координаты установки камеры и расположение СК SGURF.

Выбор оператором ОМ в рабочей зоне

Используемые в СТЗ сенсоры позволяют получать цветное облако точек видимой части сцены. На рисунке 2 представлен вид системы визуализации с облаком точек сцены. На нем видно, что в поле зрения попадают различные объекты манипулирования, а также стол и объекты окружения.

Для определения координат ОМ необходимо решить две задачи: классифицировать объект и выделить из облака точек те точки, которые принадлежащие объекту. На данном этапе первая задача решается оператором путем указания, с каким именно объектом будет происходить работа. Вторая задача решается при помощи элементов графического интерфейса.

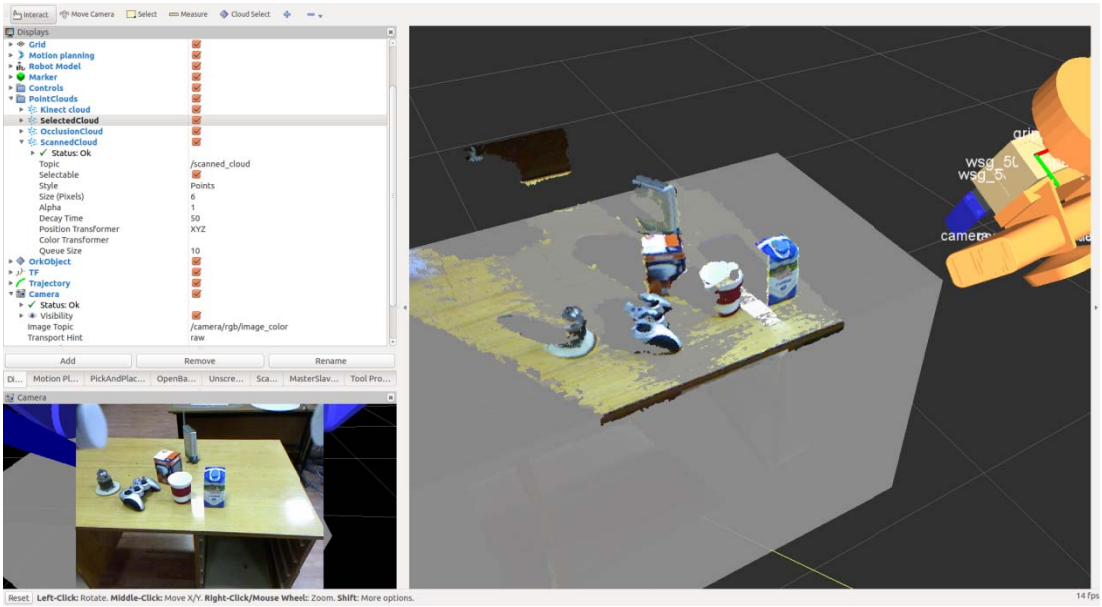


Рисунок 2 – Облако точек сцены

Оператор при помощи мыши указывает точку на поверхности нужного объекта в представленном в окне облаке точек, тем самым определяя двумерные координаты точки на экране. Для определения координат указанной точки в трехмерном облаке точек строится луч, проходящий через указанную пользователем двумерную точку и перпендикулярный плоскости виртуальной камеры. Та точка из трехмерного облака точек, расстояние от которой до луча будет минимальным, считается выбранной оператором точке ОМ.

После того, как на облаке точек определена одна точка, принадлежащая ОМ, системой выделяется кластер точек, принадлежащих объекту. Для этого вокруг вычисленной точки строится куб, размер которого зависит от размеров ОМ и задается при помощи интерфейса пользователя. Все точки *исходного* облака точек, находящиеся вне куба, удаляются. Среди *оставшихся* определяются точки, принадлежащие самой нижней горизонтальной плоскости (обычно это плоскость стола). Затем эти точки удаляются. Если в результате удаления остался один кластер точек, то есть, расстояние между каждой из точек и ее ближайшим соседом не превышает 10мм, этот кластер считается кластером точек объекта Если кластеров несколько, выбирается тот, к которому наиболее близка указанная оператором точка(на рисунке 3 отмечен зеленым).

После определения кластера объекта выделяются кластеры препятствий. Для этого из исходного облака точек удаляются все точки, лежащие в заданном радиусе от каждой точки ОТ объекта. Оставшиеся точки считаются точками препятствий (на рисунке 3 отмечены красным).

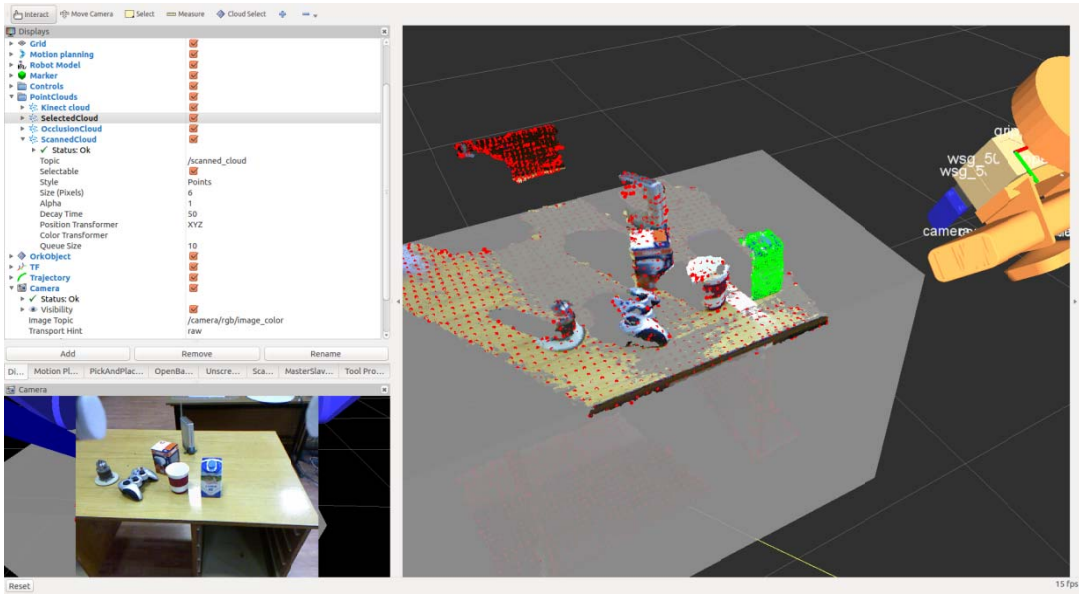


Рисунок 3 – Интерфейс выбора объекта на сцене

Результатом выбора объекта являются сформированные облака точек поверхностей, принадлежащих выбранному объекту манипулирования, а также других объектов на сцене, которые могут быть рассмотрены как препятствия.

Оценка расположения объекта

После выделения точек объекта из исходного ОТ можно определить расположение системы координат, связанной с трехмерной моделью объекта, относительно системы координат сенсора. Алгоритм работы следующий.

Для выделенного кластера точек (зеленый на рисунке 3) рассчитывается OUR-CVFH дескриптор, а также матрица расположения СК SGURF относительно СК датчика $\mathrm{T}^{T}_{sensor,\ SGURF_o}$.

При помощи алгоритмов поиска ближайших соседей в сформированной ранее математической модели отыскивается набор из M гистограмм, максимально близких к гистограмме данного кластера (количество определяется оператором и обычно составляет 10-15 штук). При этом каждой гистограмме соответствуют матрицы расположения камеры относительно СК объекта $\mathrm{T}_{obj_m,\ sensor}$ и матрицы расположения СК SGURF относительно СК датчика $\mathrm{T}_{sensor,\ SGURF_m}$.

Затем производится расчет предварительных преобразований от СК датчика к СК объекта для каждого из найденных соседей (M штук):

$$\mathrm{T}_{obj,\ sensor} = \mathrm{T}_{obj_m,\ sensor} * \mathrm{T}_{sensor,\ SGURF_m} * \mathrm{T}^{T}_{sensor,\ SGURF_o} \qquad (1)$$

В целях уточнения преобразований производится выравнивание модели объекта и уточнение координат. Для этого для каждого из предполагаемых вариантов из БД загружается модель объекта, устанавливается в начало СК сенсора, и к ней применяются преобразования вида (1). Далее при помощи итеративного алгоритма ближайших точек [4] производятся попытки совместить геометрическую модель объекта и кластер точек, причем перемещается только загруженная модель объекта, тогда как кластер точек остается неподвижным (рисунок 4). Результатом выравнивания является матрица смещенияT_{icp}. Окончательные матрицы расположения объекта будут рассчитываться по формуле:

$$\mathrm{T}_{fin} = \mathrm{T}_{icp} * \mathrm{T}_{obj,\ sensor} \tag{2}$$

На рисунке 4 изображены гипотезы расположения объекта. Красным цветом показан кластер точек, принадлежащий объекту и сформированный во время выбора ОМ в рабочей зоне. Синим показаны трехмерные модели объекта, к которым применили преобразования вида (1), то есть гипотезы расположения объекта по «грубым прикидкам». Зеленым цветом изображены модели объекта с преобразованиями вида (2), то есть уточненные гипотезы расположения.

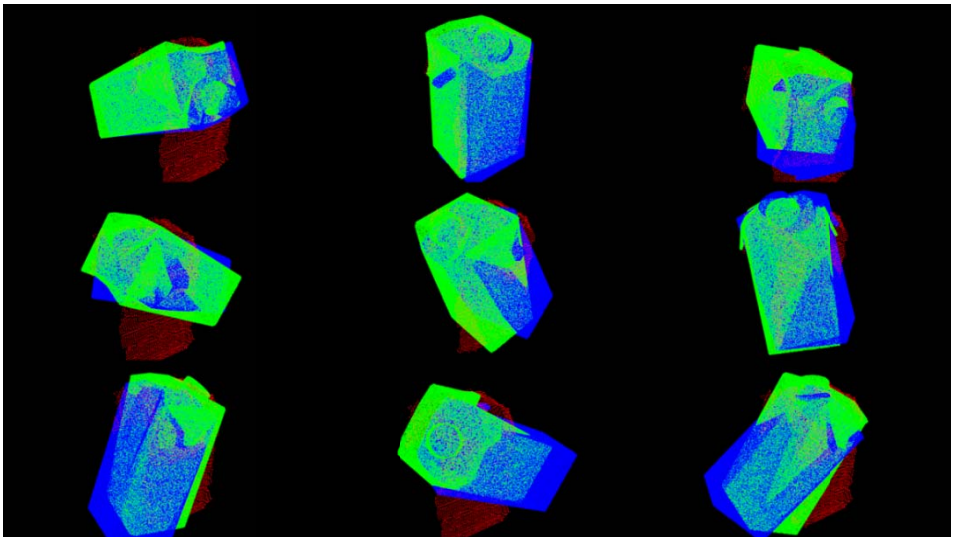


Рисунок 4 – Гипотезы расположения объекта

Чтобы из всех гипотез выбрать наиболее подходящую, для каждой из гипотез производится проверка того, насколько точки кластера совпадают с геометрической моделью объекта. Если точки лежат вблизи поверхности объекта в заданных оператором пределах, то гипотеза принимается, если нет – гипотеза отбрасывается. Если проверку прошли несколько гипотез, то выбирается та, у которой среднее отклонение точек минимально. На рисунке 5 изображена трехмерная модель объекта, расположенная в соответствии с наилучшей гипотезой расположения объекта.

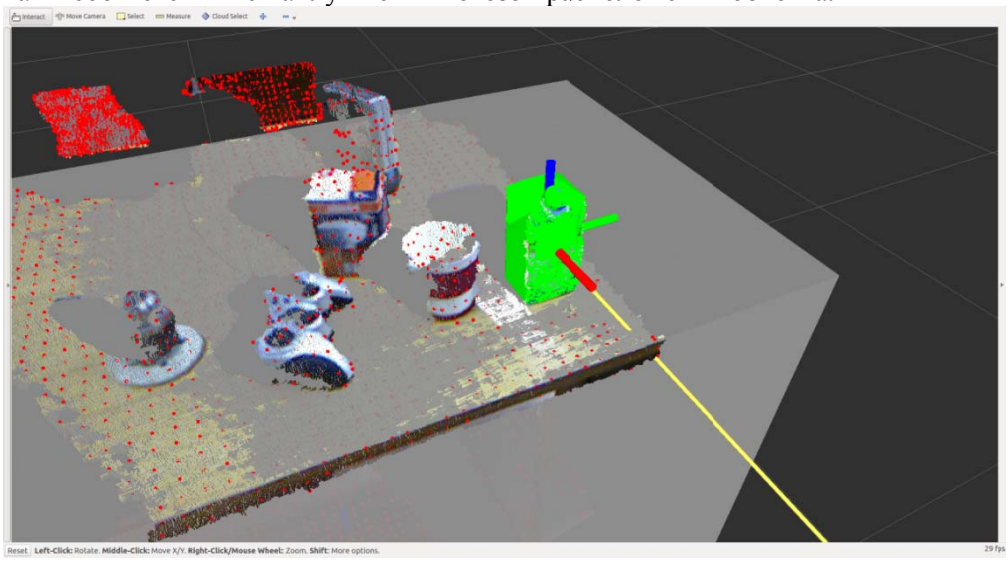


Рисунок 5 – Результат работы алгоритма оценки координат объекта

Представленная система технического зрения была реализована на функционально-моделирующем стенде Дмитровского Филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана. Аппаратная часть СТЗ состоит из сенсоров, в качестве которых использовались датчики глубины семейства PrimeSense, такие как Microsoft Xbox Kinect 360 и Asus Xtion Pro Live.

Программная часть реализована с использованием мета-операционной системы ROS[5], набора библиотек для работы с облаками точек Point Cloud Library (PCL) [6] и фреймворка для создания алгоритмов систем технического зрения Object Recognition Kitchen (ORK) [7].

PCL – библиотека алгоритмов для обработки облаков точек и трехмерной геометрии с открытым исходным кодом. PCL содержит алгоритмы фильтрации, сегментации, сглаживания и анализа облаков точек, а также алгоритмы расчета различных дескрипторов.

ORK представляет собой удобный фреймворк для создания алгоритмов работы систем технического зрения. ORK содержит несколько готовых алгоритмов распознавания объектов, а также позволяет разрабатывать и встраивать новые методы и способы распознавания. В ORK реализован ряд необходимых при работе функций, таких как работа с базой данных, работа с сенсорами, интеграция с ROS и т.д. ORK реализован в виде набора программ, которые взаимодействуют как ориентированный ациклический граф.

Разработанные алгоритмы и программное обеспечение позволяют производить оценку расположения и пространственной ориентации объектов манипулирования с точностью порядка 5 мм по линейным координатам и 2 градусов по угловым. В дальнейшем планируется развитие СТЗ в направлении автоматической классификации объектов, а также увеличение точности выбора гипотез путем применения алгоритмов машинного обучения.

1. http://fms.bmstu.ru/
2. https://www.willowgarage.com/pages/pr2/overview
3. Aldoma A., Tombari F., Rusu R., and Vincze M. OUR-CVFH Oriented, Unique and Repeatable Clustered Viewpoint Feature Histogram for Object Recognition and 6DOF Pose Estimation. //DAGM/OAGM Symposium. Lecture Notes in Computer Science Volume 7476, pp. 113-122. Springer, 2012.
4. http://ru.wikipedia.org/wiki/Итеративный_алгоритм_ближайших _точек
5. http://wiki.ros.org/
6. http://pointclouds.org/
7. http://wg-perception.github.io/object_recognition_core/

A. Leskov, K. Bazhinova

PLANNING AND EVALUATION SYSTEM FOR GRASPS WITH MANIPULATION ROBOTS

Dmitrov branch of BMSTU, Dmitrov
c8.df.mgtu@gmail.com

Abstract

A planning system for automatic grasping of objects with manipulation robots is presented. The problem of grasp evaluation is considered and experience of applying normalized quality metrics is analyzed. The Bayesian networks are proposed to increase the efficiency of existing planning methods.

Keywords: automatic object grasping, grasp planning, grasp quality, Bayesian network.

А.Г. Лесков, К.В. Бажинова

СИСТЕМА ПЛАНИРОВАНИЯ И ОЦЕНКИ ЗАХВАТА ОБЪЕКТОВ МАНИПУЛЯЦИОННЫМ РОБОТОМ

ДФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Дмитров
c8.df.mgtu@gmail.com

Аннотация

Предложена система планирования автоматического захвата объектов манипуляционным роботом. Рассмотрен вопрос оценки захвата и проанализирован опыт применения взвешенных нормализованных значений показателей качества. Предложено использование байесовских сетей доверия для увеличения эффективности существующих методов планирования захвата.

Ключевые слова: автоматический захват объектов, планирование захвата, качество захвата, байесовская сеть.

Введение

Захват объектов манипулирования в настоящее время является одной из основных операций, выполняемых манипуляционными роботами. Несмотря на значительные достижения в разработке различных методов планирования автоматической операции захвата [1], гарантировать надежное выполнение захвата при работе с широким перечнем объектов, обладающих различными формами, свойствами материала и поверхности, не всегда представляется возможным. Поэтому дальнейшее повышение эффективности синтеза автоматического захвата объектов манипуляционными роботами является актуальной задачей.

Планирование автоматического захвата объектов манипуляционными роботами

Важный вклад в повышение надежности захвата и манипулирования объектами вносят научные исследования способов оценки захвата. Наиболее широко применяется моделирование процесса захвата в виртуальной среде с последующим анализом геометрии контакта между поверхностью объекта манипулирования и поверхностями звеньев захватного устройства манипулятора [2], анализ контактных сил и пространств возможных воздействий на объект [3], накладывание ограничений на пространство конфигураций манипулятора [4].

Предлагаемая система планирования захвата [5] представлена на рисунке 1 и включает в себя работу системы технического зрения, графическое моделирование виртуальной сцены, аппроксимацию геометрии контакта объекта и звеньев захватного устройства манипулятора, генерацию гипотез захвата и их верификацию на основе замкнутости захвата по силе, а также оценку гипотез захвата на основе показателей качества.

Система реализована на функционально-моделирующем стенде Дмитровского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана. Программное обеспечение стенда позволяет решать задачи автоматического распознавания объектов манипулирования и определения их расположения относительно манипуляционных роботов на основе информации системы технического зрения. Геометрическая модель объекта используется для формирования базы данных захватов, которые генерируются, верифицируются по признаку замкнутости по силе и оцениваются в соответствии с выбранным критерием качества. При этом определяются координаты захватного устройства манипулятора, необходимые для выполнения захвата, а также положения каждого из пальцев схвата.

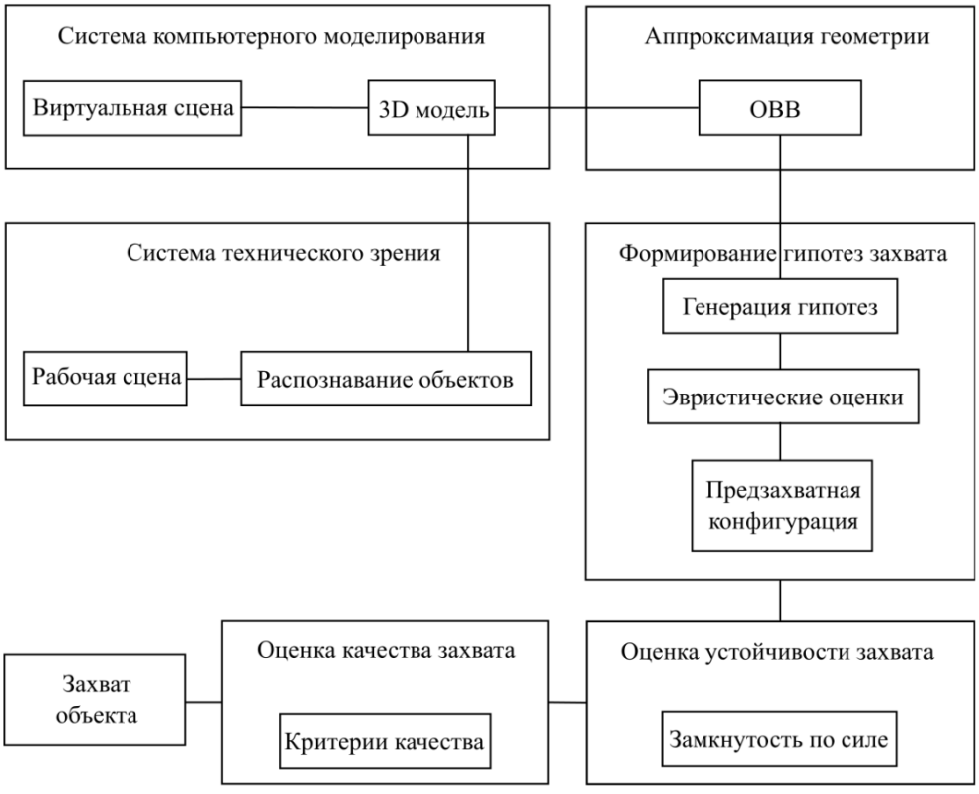


Рисунок 1 – Структура системы планирования и оценки захвата

Оценка качества захвата

Результатом работы системы оценки качества захвата должен стать ранжированный набор способов захвата объекта, которые могут быть успешно использовпны при выполнении операции манипуляционным роботом. Один из способов, позволяющих снизить время планирования и оценки захватной конфигурации, заключается в одновременном применении различных критериев, указывающих на свойства захвата. В качестве глобального количественного показателя качества захвата применяются взвешенные нормализованные оценки ряда факторов [6]:

$$K_{Г} = \alpha K_{Т} + \beta K_{ЗУ} + \gamma K_{Д},$$

где $K_{Г}$ – глобальный показатель качества,

$K_{Т}$, $K_{ЗУ}$, $K_{Д}$ – критерии качества, связанные с геометрическим положением точек контакта поверхностей объекта манипулирования и звеньев схвата, конфигурацией захватного устройства, параметрами выполняемой операции, отличием моделируемого захвата от выполненного на реальном устройстве,

α, β, γ – весовые коэффициенты критериев качества.

– Критерии качества $K_{Т}$, связанные с положением точек контакта, учитывают свойства объекта, такие как форма, размер, вес, коэффициент трения, а также свойства захвата замкнутости по форме и силе. Принято различать критерии, учитывающие только алгебраические свойства матрицы захвата G, связывающей контактные силы и воздействие, которое захватное устройство может оказать на объект (минимальное сингулярное значение матрицы G, объем эллипсоида в пространстве сил и моментов, действующих на объект [7], индекс изотропности захвата [6]), критерии, учитывающие геометрические характеристики захвата (форма и размер фигуры, построенной на точках контакта [8], расстояние от ее центроида до центра масс объекта [9], минимальный размер независимой контактной площадки [10]), и критерии, связанные с предельными усилиями, которые могут развить пальцы захватного устройства (величина наибольшего возмущающего воздействия, которое может выдержать захват [3], сумма нормальных компонент контактных сил [11]).

– Критерии качества $K_{ЗУ}$, связанные с конфигурацией захватного устройства, учитывают матрицу-якобиан схвата и включают в себя показатели, характеризующие возможности манипулирования объектом [4].

– Группа критериев качества $K_{Д}$ вводится дополнительно при необходимости учесть характер выполняемой операции, статистику выполнения смоделированного захвата на реальном устройстве [12].

Задачу выбора весовых коэффициентов в представленном уравнении принято решать различными способами, включая расстановку равных весов, расчет на основе анализа корреляции критериев [12] и полное исключение некоторых групп критериев. Однако игнорирование реальной геометрии кисти может привести к планированию конфигурации, недоступной для реального захватного устройства. В то же время оптимальная конфигурация кисти может генерировать захват, не способный выдерживать даже малые возмущающие воздействия. В случае, когда выбор производится эмпирически после проведения серии экспериментов, возникает необходимость постоянной переоценки удельных весов компонентов глобального показателя качества, что затруднительно в реальных условиях работы робототехнического комплекса.

Учитывая приведенные выше сложности планирования и оценки захвата, в качестве одного из способов повышения эффективности существующих методов предлагается использовать вероятностную модель на основе байесовских сетей доверия. Переменным в подобных графических вероятностных моделях не требуется одинакового представления, поэтому сети доверия могут содержать как набор характеристик захвата, получаемых во время моделирования, так и результаты выполнения захвата, а также отражать зависимости между ними.

Информация о свойствах объекта (3D модель, размер, свойства поверхности, жесткость, упругость), свойствах захвата (конфигурация захватного устройства, вектор подхода захватного устройства к объекту манипулирования) накладываемых оператором ограничениях, можно представить как множество переменных

$$X=\{O,G,C\},$$

где O – множество свойств объекта, $O=\{O_1,\ldots,O_k\}$,

G – множество свойств захвата, $G=\{G_1,\ldots,G_l\}$,

C – множество накладываемых ограничений, $C=\{C_1,\ldots,C_m\}$.

Для моделирования зависимостей между элементами множества $X=\{X_1,\ldots,X_n\}$ строится граф S, каждая вершина которого соответствует одной случайной переменной, а дуги графа кодируют отношения условной независимости между переменными.

Полное совместное распределение значений в вершинах можно записать в виде декомпозиции локальных распределений:

$$P(x)=P(x\mid\theta_S,S)=\prod_{i=1}^{n}P(x_i\mid pa_i;\theta_i,S),$$

где x_i – значение X_i,

pa_i – прямые родители переменной X_i в графе,

$\theta_S=(\theta_1,\ldots,\theta_n)$ – вектор условных распределений каждой переменной X_i.

На рисунке 2 представлен вид байесовской сети доверия для планирования и оценки захвата.

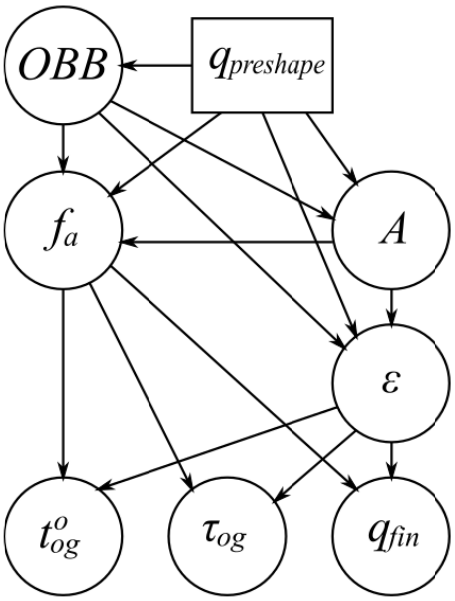


Рисунок 2 – Байесовская сеть доверия для планирования и оценки захвата

На рисунке 2 введены обозначения: *OBB*– габариты ограничивающего прямоугольника, f_a – сумма нормальных компонент контактных сил, ε – радиус максимальной гиперсферы, содержащейся в пространстве воздействий на объект, A – площадь многоугольника захвата, t_{og}^{o}– положение захватного устройства относительно объекта, τ_{og}– ориентация захватного устройства относительно объекта, $q_{preshape}$– значение углов шарниров захватного устройства в предзахватной конфигурации, q_{fin}– значение углов шарниров захватного устройства в финальной конфигурации.

Структура сети эмпирически установлена на основе нашего представления о взаимосвязях между компонентами множеств свойств *O*, *G* и *C*. Обучение сети доверия включает определение характера зависимости переменной X_i от других случайных переменных $X_{i\neq j}$ множества *X* по набору экспериментальных данных $D=\{o,g,c\}$ и гипотез оператора. Обучение проводится на основе существующих эффективных методов, которые используются для вычислений и обучения байесовских сетей [13]. Обученная сеть позволяет вычислить условное распределение одной или нескольких переменных X_i при известных значениях других переменных $X_{i\neq j}$.

Заключение

Предложенные методы являются гибким инструментом для оценки качества захватов широкого круга объектов манипулирования, позволяют учитывать как набор параметров операции, полученных во время моделирования захвата, так и результаты выполнения захвата, и отражать зависимости между ними. Дальнейшее развитие системы планирования и оценки захвата предполагает увеличение эффективности существующих методов с помощью более широкого применения алгоритмов машинного обучения.

1. Sahbani A., El-Khoury S., Bidaud P. An overview of 3D object grasp synthesis algorithms. Robotics and Autonomous Systems, Paris, France, 2011.
2. OpenGRASP – A Simulation Toolkit for Grasping and Dexterous Manipulation. URL http://opengrasp.sourceforge.net.
3. Ferrari C., Canny J. Planning optimal grasps. In Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1992, volume 3, pp. 2290 –2295.
4. Yoshikawa T. Manipulability of robotic mechanisms. Int. J. Robotics Research, 1985, 4(2), pp. 3–9.
5. Лесков А.Г., Илларионов В.В., Калеватых И.А., Морошкин С.Д., Бажинова К.В., Феоктистова Е.В. Аппаратно-программный комплекс для решения задач автоматического захвата объекта манипуляторами // Инженерный журнал: наука и инновации, 2015, вып. 1. URL: http://engjournal.ru/catalog/pribor/robot/1361.html
6. Kim B., Oh S., Yi B., Suh I.H. Optimal grasping based on non-dimensionalized performance indices. In Proc. IEEE IROS 2001, pp. 949–956.
7. Li Z., Sastry S. Task oriented optimal grasping by multifingered robot hands. In Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1987, volume 4, pp. 389–394.
8. B. Mirtich and J. Canny. Easily computable optimum grasps in 2D and 3D. In Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1994, pp. 739–747.
9. Chinellato E., Morales A., Fisher R.B., Pobil A.P. Visual quality measures for characterizing planar robot grasps. IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics - Part C: Applications and Reviews, 2005, 35(1), pp. 30–41.
10. Ponce J., Faverjon B. On computing three-finger force-closure grasps of polygonal objects. IEEE Trans. Robotics and Automation, 1995, 11(6), pp. 868–881.
11. Liu G., Xu J., Wang X., Li Z. On quality functions for grasp synthesis, fixture planning and coordinated manipulation. IEEE Trans. Automation Science and Engineering, 2004, 1(2), pp. 146–162.
12. Chinellato E. Robust Strategies for Selecting Vision-Based Planar Grasps of Unknown Objects with a Three-Finger Hand. Master of Science Thesis. School of Artificial Intelligence, Division of Informatics, University of Edinburgh, 2002.
13. D. Heckerman. A tutorial on learning with bayesian networks. Technical report, Microsoft Research,1996.

A.A. Piskarev, B.B. Mikhailov

PIPELINE JOINT BEVEL DETECTION METHODS USING 3D-VISION SYSTEM

Bauman Moscow State Technical University
piscariov@gmail.com

Abstract

Two bevel detection algorithms are compared in this article. Source data obtained via 3D vision system. Two distinct approaches applied: deterministic algorighm based on Nelder-Mead method and stochastic algoritm based on Metropolis method, also known as simulated anneal.

Keywords: surface approximation, recognition algorithms, algorithms comparison.

А.А. Пискарёв, Б.Б. Михайлов

МЕТОДЫ ВЫДЕЛЕНИЯ ФАСКИ НА СТЫКАХ ТРУБ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМЫ ОБЪЁМНОГО ЗРЕНИЯ

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва
piscariov@gmail.com

Аннотация

В статье сравниваются два алгоритма выделения фаски на цилиндрической поверхности трубопроводов. Исходные данные получены с помощью системы объёмного зрения. Применены два различных подхода: детерменистический алгоритм на основе метода Нелдера-Мида и стохастический алгоритм на основе метода Метрополиса, также известного как метод имитации отжига.

Ключевые слова: аппроксимация поверхностей, алгоритмы распознавания, сравнение алгоритмов

Введение

Магистральные трубопроводы высокого давления являются стратегически важными объектами. Надёжность и бесперебойность работы трубопроводных систем, их эксплуатационные параметры напрямую зависят от характеристик сварных швов. В настоящее время сварка осуществляется вручную либо под контролем оператора. В статье [5] было предложено дополнить сварочный комплекс системой технического зрения и измерять с её помощью параметры стыка, чтобы сделать систему управления сварочного комплекса адаптивной. На первом этапе была решена задача восстановления параметров цилиндрической поверхности по облаку точек, полученному из системы объёмного зрения. Чтобы выделить непосредственно стык, необходимо распознать границу примыкания конической фаски к цилиндру. Решению этой задачи посвящена данная статья.

Постановка задачи

Задача сформулирована следующим образом: имеются две трубы большого диаметра. Концы труб имеют фаску с заранее известным углом. Требуется разработать систему технического зрения, которая позволила бы локализовать и описать отдельно взятый стык с учётом изменяющихся погрешностей укладки, воздействия условий окружающей среды.

В статье предлагаются алоритмы, позволяющие на основе данных системы объёмного зрения определить положение и параметры стыка, образованного коническими фасками труб.

Алгоритмы распознавания

Введём необходимые обозначения и систему координат. Система объемного зрения выдаёт изображение рабочей сцены в виде множества точек, каждая из которых имеет три координаты. Начало координат привязано к камере, ось y ориентирована вдоль оптической оси камеры, оси x и z ориентированы горизонтально и вертикально поперёк оптической оси. Обозначим входное множество точек символом U, а сами точки — символом u. Компоненты точек, соответствующие осям координат, обозначим за u_x, u_y и u_z. Поскольку поле зрения камеры ограничено, компоненты точек также ограничены соответствующими отрезками $U_x = [x_{min}, x_{max}]$, $U_y = [y_{min}, y_{max}]$ и $U_z = [z_{min}, z_{max}]$.

Для упрощения задачи сделаем ряд допущений. Во-первых, считаем, что угол между продольными осями труб и осью x небольшой. Это означает, что при подготовке объектив камеры роботизированного комплекса необходимо направить перпендикулярно к осям труб. Дополнительно предполагаем, что стык труб находится близко к середине поля зрения камеры. Для этого камера при подготовке закрепляется над стыком. Конические поверхности, образующие фаску, считаем соосными цилиндрическим поверхностям труб.

Основываясь на допущении о расположении шва, разделим поле зрения на три зоны таким образом, чтобы в крайних областях не содержались точки, расположенные на стыке. Поскольку оси труб ориентированы близко к оси x, выполним разбиение по отрезку U_x.

Внешние отрезки обозначим символами U_x^a и U_x^b, а внутренний — символом U_x^c. Подмножества U, соответствующие этим отрезкам, обозначим как U^a, U^b и U^c.

Согласно принятым допущениям, каждое из множеств U^a и U^b содержит лишь те точки, которые принадлежат цилиндрическим поверхностям труб.

Цилиндрическая поверхность в трёхмерном пространстве может быть описана следующим уравнением:

$$\rho_{x_0 y_0 z_0 n_x n_y n_z}(x, y, z) = R$$

Здесь ρ - функция расстояния от точки до оси цилиндра, её параметры x_0, y_0 и z_0 - координаты точки, принадлежащей оси, n_x, n_y и n_z - компоненты направляющего вектора оси, а R - радиус цилиндра. Радиус цилиндра считаем известным, так как трубопровод изготавливается из типовых труб.

При некоторых значениях параметров суммарное квадратичное отклонение точек множества U^a минимально. Найдём эти параметры.

Для множества U^a сформулируем задачу нелинейной оптимизации. В качестве допустимого множества возьмём множество коэффициентов уравнения цилиндра, каждый из которых ограничен минимальным и максимальным значениями:

$$x_0 \in [x_0^{min}, x_0^{max}] \quad y_0 \in [y_0^{min}, y_0^{max}] \quad z_0 \in [z_0^{min}, z_0^{max}]$$

$$n_x \in [n_x^{min}, n_x^{max}] \quad n_y \in [n_y^{min}, n_y^{max}] \quad n_z \in [n_z^{min}, n_z^{max}]$$

Размерность допустимого множества равна шести, однако координаты точки на оси цилиндра линейно зависимы, как и компоненты направляющего вектора оси, поэтому мы можем зафиксировать некоторые из них.

$x_0 = 0$

$n_x = 1$

Допущение об ориентации труб позволяет нам полагать, что труба не ортогональна оси x, то есть, компонента n_x не равна нулю, а её ось пересекает плоскость YZ. Таким образом, размерность допустимого множества сокращается до четырёх, а неизвестными остаются параметры y_0, z_0, n_y и n_z.

В качестве целевой функции выберем суммарное квадратичное отклонение от поверхности цилиндра по всем точкам множества U^a. В силу свойств цилиндра отклонение от поверхности равно разности расстояния до оси и радиуса:

$$f(y_0, z_0, n_y, n_z) = \sum_i (r_{u_i^a}(y_0, z_0, n_y, n_z) - R)^2$$

Задача аппроксимации таким образом сводится к минимизации целевой функции f. Поскольку целевая функция нелинейна, при моделировании был выбран метод численной оптимизации Нелдера-Мида.

Решив задачу нелинейной оптимизации, найдём коэффициенты уравнения оси и радиус цилиндра, которому принадлежат точки множества U_a: y_0^a, z_0^a, n_y^a и n_z^a.

Аналогично, найдём параметры цилиндра для точек из множества U_b: y_0^b, z_0^b, n_y^b и n_z^b.

Для поиска срезов труб исследуем множество U_c. Большая часть точек этого множества принадлежит составным цилиндро-коническим поверхностям, образуемым поверхностями стыкуемых труб и соответствующих им фасок. Незначительное количество точек - выбросы, шумы, ошибки измерения и т. п. Поскольку коническая поверхность фаски соосна трубе, положение среза трубы однозначно определяется положением вершины конуса на оси трубы: (x_0^a, y_0^a, z_0^a) - для трубы, описанной точками множества U_a, и, соответственно, (x_0^b, y_0^b, z_0^b) - для трубы, описанной точками множества U_b.

В статье рассматриваются два метода выделения фасок, которые отличаются подходом к задаче оптимизации.

Одновременное распознавание обеих фасок

Точки множества U_c аппроксимируются составной поверхностью, состоящую из двух

цилиндров и соосных с ними конусов. В ходе апроксимации минимизируется суммарное квадратичное отклонение по всем точкам. Поскольку параметры осей цилиндров найдены на предыдущем этапе, вычислению подлежат координаты вершин конусов на осях цилиндров. Допустимым множеством в задаче оптимизации является множество координат этих вершин.

Размерность множества равна шести, однако параметры осей конусов уже найдены на предыдущем этапе, а две из трёх координат каждой вершины можно вычислить, подставив третью в уравнение оси, поэтому размерность допустимого множества можно сократить до двух:

$$x_0^a \in \left[x_0^{min}, x_0^{max}\right]$$

$$x_0^b \in \left[x_0^{min}, x_0^{max}\right]$$

Целевая функция принимает следующий вид:

$$f_c = \sum min\left(\left(\rho_a\left(\vec{u}^c\right) - R_a\right)^2, \left(\rho_b\left(\vec{u}^c\right) - R_b\right)^2, \left(\rho_a\left(\vec{u}^c\right) - R_a^{cone}\left(\vec{u}^c\right)\right)^2, \left(\rho_b\left(\vec{u}^c\right) - R_b^{cone}\left(\vec{u}^c\right)\right)^2\right)$$

Здесь $R_a^{cone}\left(\vec{u}^c\right)$ и $R_b^{cone}\left(\vec{u}^c\right)$ - радиусы окружностей, образованных пересечением поверхностей конусов с плоскостями, проходящими перпендикулярно их осям через точку u^c .

Целевая функция, построенная таким образом, является выпуклой в некоторой окрестности оптимальной точки, поэтому задача оптимизации решена методом Нелдера-Мида.

Последовательное распознавание фасок

Для каждой из труб во множестве U_c поочерёдно выделены точки, принадлежащие поверхности цилиндра с примыкающей к нему фаской.

Допустимым множеством является множество координат вершины конуса на оси соответствующей трубы. Размерность множества равна трём, однако две из трёх координат вершины можно вычислить, подставив третью в уравнение оси, поэтому размерность допустимого множества можно сократить до единицы:

$$x_0^a \in \left[x_0^{min}, x_0^{max}\right]$$

Целевая функция для трубы A принимает следующий вид:

$$f_a = \sum min\left(\left(\rho_a\left(\vec{u}^c\right) - R\right)^2, \left(\rho_a\left(\vec{u}^c\right) - R^{cone}\left(\vec{u}^c\right)\right)^2, \varepsilon_a\right)$$

Здесь $R^{cone}\left(\vec{u}^c\right)$ - радиус основания фаски с плоскостью, проходящей перпендикулярно его оси через точку u^c ; ε_a - пороговое значение отклонения для точек, принадлежащих искомой поверхности. Величина ε_a вычисляется на предыдущем этапе.

Построенная таким образом целевая функция имеет убывает при возрастании количества точек, имеющих отклонение от искомой поверхности не более заданного. Целевая функция является невыпуклой и имеет множество локальных минимумов, поэтому традиционные численные методы оптимизации непригодны. Для решения задачи использован стохастический метод «имитации отжига» [6].

Выделение стыка

Таким образом, получены недостающие параметры конических поверхностей фасок. Далее построены линии пересечения поверхностей фасок с поверхностями труб. В силу соосности эти линии являются окружностями. Найденные окружности — искомые срезы труб.

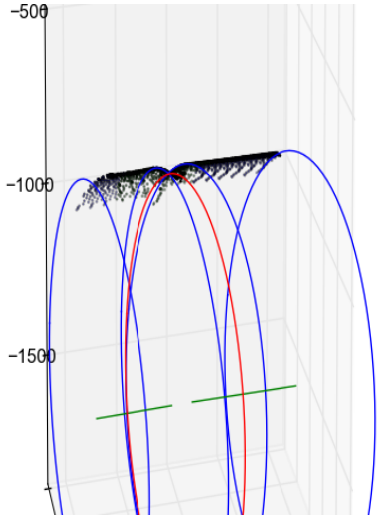


Рисунок 1 – Исходные точки, границы и оси цилиндров и линия стыка

Место стыка условно построено в виде окружности с центром посередине отрезка, соединяющего центры окружностей срезов. Плоскость, в которой строится окружность, задана таким образом, чтобы её нормаль являлась биссектрисой к направляющим векторам осей труб. Радиус окружности определён как средняя величина найденных радиусов труб, уменьшенная на толщину трубы. Полученная линия стыка является условной и использована для наглядности изображения на графике, в реальности сварку необходимо осуществить в пространственном участке, ограниченном плоскостями среза, цилиндрическими поверхностями и фасками труб.

Моделирование

Для проверки адекватности алгоритма была написана программа на Python. В качестве входных данных использовались результаты сканирования стыка фрагментов труб, используемых при прокладке магистрального трубопровода. Выходные данные включали в себя координаты места стыка, диаметры труб, компоненты направляющих векторов осей и проекции угла между ними. В ходе эксперимента макет сканировался из различных положений и с различным углом взаимного расположения труб. Были опробованы оба способа поиска фаски: выделение обеих фасок одновременно, с использованием численного метода оптимизации, и последовательное выделение фасок, с использованием стохастического метода. Графическая иллюстрация результатов представлена на Рис. 1: изображены точки исходного множества U, оси цилиндров, линии среза и окружности, ограничивающие цилиндрические поверхности с противоположной от среза стороны, а таже условная линия стыка.

Некоторые из измеренных параметров стыка указаны в таблице 1.

Таблица 1. Параметры стыка труб

Величина	Последовательный поиск		Обе фаски одновременно	
	Труба A	Труба B	Труба A	Труба B
Радиус поверхности, мм	610,00			
Среднеквадратичное отклонение, мм	0,71	1,31	1,82	1,65
Угол между осями труб, град	7,45		7,51	
Расстояние между основаниями фасок, мм	40,13		42,15	
Радиус окружности, описывающей стык, мм	589,93		592,25	

Заключение

По итогам проделанной работы можно заключить, что задача выделения места стыка с конической фаской успешно решена для фрагментов труб диаметром 1,2 м. Достигнутая точность позволяет использовать роботизированный сварочный комплекс. Опробованы различные методы выделения фаски: более высокую точность показал стохастический алгоритм, позволяющий выделить фаски последовательно.

1. Ильин В.А., Поздняк 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. 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
5. Пискарёв А. А., Михайлов Б. Б. - Алгоритм распознавания стыков труб магистральных трубопроводов для управления манипулятором сварочного робота — Экстремальная робототехника // Труды международной науч.- техн. конф. – С-Пб.: Изд. «Политехника-сервис», 2015, с. 343-351.
6. Джонс М. Т. – Программирование искусственного интеллекта в приложениях. — М.: ДМК Пресс, 2004, С. 25 – 42.

K.Y. Senchik, V.V. Harlamov, V.Y. Nekrasov, N.A. Gryaznov, G.S. Kireeva

DEVELOPMENT OF WORKING ALGORITHMS OF THE NEW CARDIOCOMPRESSOR FOR CARDIOPULMONARY RESUSCITATION

CRDI RTC, Saint-Petersburg, Russia
k-yurivich@bk.ru

Abstract

Manual chest compression method as a part of cardiopulmonary resuscitation (CPR) is a common, but not necessarily effective method of emergency in cases of the sudden cardiac arrest. In turn, the efficiency of methods using special apparatus for CPR depends on how a particular automatic system is simple to setup, operate and maintain. The article presents the data on the Russian external cardiac compressor (ECC) of original design for efficient chest compression and maintaining patient's blood pressure at the required level. The algorithms of automatic operation of the ECC and the results of experimental measurements, confirming the efficiency of the proposed algorithms are described.

Keywords: cardiopulmonary resuscitation, external cardiac compressor, arterial pressure, mathematic modeling.

The number of people dying every year in Russia from sudden cardiac arrest is compared with the population of a large city and is about 300 000 cases [2]. According to official statistics, in Europe and the United States in 1-5 cases per thousand hospitalized patients it is necessary to provide measures of cardiopulmonary resuscitation (CPR) [3]. CPR typically is not a procedure which restarts the circulatory and respiratory functions. CPR may be effective for saving circulatory and respiratory functions in the quantity necessary for the survival of patient until his own circulatory and respiratory function are not reestablished. Non-apparatus CPR techniques are now well developed and routinely used in emergency practice in sick and injured adults and children [9]. A significant disadvantage of these techniques is the inability to perform CPR chest compressions effectively due to the rapid fatigue of the reanimator (time of effective chest compressions is about 3 min.) [4, 5, 7, 8]. Another limitation in the applicability of manual chest compressions is the difficulty arising when transporting of a patient is required. So the development of automated system with external cardiac compressor (ECC) is a matter of interest not only to replace a human during CPR, but also to be able to control the parameters of the compression depending on the physiological characteristics of the patient.

In the Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics (Saint-Petersburg, Russia) mechatronic cardiac compressor has been developed and successfully tested. This cardiac compressor will be the main component of the automated ECC. All parts of the ECC are under the software control and are listed below:

- electric drive with the transmission, converting the rotary motion of the motor into the linear motion of the loading platform of the cardiac compressor;
- driver of electric drive;
- a set of sensors for monitoring the patient's condition, the compression process control and management (invasive pressure sensor, a non-invasive pressure sensor, a load on the chest compression sensor, values of chest compression sensor);
- microcontroller control system with a set of interfaces, including ones for additional sensors and systems;
- additional sensors and systems: Doppler flow velocity meter, cardiograph, pulse oximetry sensor, body temperature, respiratory rate detection system, etc. (up to four at a time);
- indication and displaying device;
- an input device;
- pager;
- a secondary power supply for generating power to the components of the system;
- a system consisting of a set of compression sleeves for limbs with electronically controlled pneumatic pump unit and pressure sensors mesuaring pressure (oscillographic method);
- autonomous power supply.

The operation of the automated external cardiac compressor

Management and correction of control parameters is made in accordance with data from all of the sensors using the preset algorithms. The correction algorithm is based on the theoretical calculations to determine additional blood pressure (as a result of cardiac activity) due to pressure fluctuations as a result of the ECC functioning. The algorithm consists of two reduced versions of computational algorithms running simultaneously In parallel, three values are calculated:

- determining the difference of the measured pressures in the two neighboring cycles of compression pointwise, at equivalent points with the timing of the start of compression (the position of the loading platform at the top) and calculating the sum of absolute deviations;
- determining the period of occurrence of the maximum of an additional signal to synchronize with the work of cardiac compressor;
- determining the change in the integral over the period of the compression pressure in the neighboring cycles.

The calculated values are compared with the established threshold and the law of load changes in the direction of decreasing the compression and reducing the frequency of exposure. At this stage, the amount of change is set empirically, and can't be adjusted quickly. Simultaneously, the icon of restored cardiac activity (owning a pulse) appears in the display and periodic beep is set. To refine the algorithm to the specific values of the optimal compression parameters as well as techniques of changing the settings according to the data of the patient's condition a set of statistics is required, as the analogues of the developed device do not exist. The development of the algorithms are based on American Heart Association Guidelines [6].

The variables and parameters of the automated external cardiac compressor operation

The list of program variables in the basic mode of operation is shown in Table 1.

Table 1.The parameters and constants of the basic mode

№	Parameter	Units	Min/ Max	Pitch measurement	Description
1	Frequency of compression	1/min	30/ 120	10(5*)	The frequency of repetition cycles of compression / decompression
2	Basic frequency	1/min	80	-	Constant
3	Compression/ decompression	%	10/ 90	10	The ratio of compression / decompression time
4	Force	kgF	0/ 60	5(2*)	The maximum force determined by the force value
5	Depth of compression	mm	0/ 60	5(2*)	The magnitude of chest compressions from the contact point of the sternum that is controlled by the amount of compression
6	Basic depth	mm	35	-	Constant
7	Maximal force	kgF	0/	5(2*)	Restriction on the used force by

№	Parameter	Units	Min/ Max	Pitch measurement	Description
			60		the largest compression value
8	Maximal compression	mm	0/ 60	5(2*)	Restrictions on the compression value by the force
9	Pause period	unit compression cycles	1/ 50	1	The number of cycles of compression before pausing for ventilation
10	Pause duration	sec	0/ 20	5(1*)	Pause duration
11	Control	logically	Compression	choosing	Selection of control based on the force or the compression value
12	Trajectory	-	0/ 9	1	Choice of one of the preset load laws

*Accurate set; Min – minimal value, Max – maximal value.

The general operating control algorithms of ECC subsystems include:

- self-test algorithm;
- control algorithm by the amount of force (tracking the trajectory of the loading by the applied force controlling the output of the displacement beyond the maximum set value);
- control algorithm by the compression value (tracing the path of the movement controlling restrictions on the force applied);
- correction algorithm of compression parameters according to the sensor readings (this implementation provides correction mode by the integrated pressure value);
- registration algorithm of abrupt changes in the trajectory (the applied force at a given amount of compression or the amount of compression for a given amount of force), which may be associated with fractured ribs or recovery of respiratory functions;
- interruption algorithm for pause for artificial respiration.

The aim of the development of the algorithm for processing information about an integrated blood pressure is to control the process of compression. The main objective of the algorithm of controlling blood pressure is the establishment of the start of natural circulation in order to change the operating mode of ECC. Blood pressure is measured continuously invasively, by recording the original measuring system of volume arterial waveform. It is a well-known fact that the rhythmic activity of the heart leads to a pulse − periodic oscillations of blood supply and blood pressure in the blood vessels. Blood pressure sensor connected to the patient's artery shows the pressure as a continuous signal which can be digitized. Thus obtained waveform has the general characteristic pattern and consists of individual pulse waves or oscillations [1].

We shall assume that the measured circulation process can qualitively be in one of four possible states:

- The normal functioning of the heart. Characterized by a batch process, discussed above.
- Extracorporeal circulation generated by ECC. This is characterized by a batch process similar to the natural one. Fibrillations may overlap this process, but they are in the nature of the noise component and do not affect the overall picture quality.
- Overlay of two processes. In practice this means that in the context of cardiopulmonary bypass heart muscle begins to function in a natural mode, so that the body's natural blood flow is observed. The main objective of the algorithm of controlling blood pressure since the start is the establishment of the start of natural circulation in order to change the operating mode of ECC.
- The absence of both natural and artificial blood circulation. This state corresponds to the beginning of resuscitation.

Thus, as part of the algorithm, there is the problem of describing a batch process by the measured waveform. Let's consider periodic digital signal type: $x(0), x(1), x(2), \dots x(n), \dots$ As $x(n)$– counts corresponding to the values of arterial pressure. We pose the problem of predicting the value of *x(n)* from the previously measured values:

$$x(n-1), x(n-2), x(n-3), \dots x(n-p)$$

To do this we form a linear combination:

$$\bar{x}(n) = a(1)x(n-1) + a(2)x(n-2) + \cdots + a(p)x(n-p) \quad (1)$$

As $\bar{x}(n)$ – predicted value, $a(1), a(2), \dots a(p)$– linear prediction coefficients.

The prediction error is:$e(n) = x(n) - \bar{x}(n)$.

For the mean square prediction error N successive pulses$x(n), \dots x(n+N-1)$we can write:

$$E_N = \sum_{k=0}^{N-1}(e(n+k))^2 = \sum_{k=0}^{N-1}((x(n+k) - \bar{x}(n+k))^2)^2 \quad (2)$$

The values of linear prediction coefficients will be obtained from the minimum conditions of expression (2) by $a(1), a(2), \dots a(p)$:

$$\sigma_N^2 = \min_{a(1),\dots a(p)} E_N \quad (3)$$

The value of the reached minimum σ_N^2 characterizes the quality of the signal prediction. Linear prediction coefficients can be converted to cepstral coefficients or reflection coefficients. The calculation of these values is also possible using fast Fourier transform. In the description of the process of controlling blood pressure it is important that for the batch values of linear prediction coefficients (as well as other associated features) calculated at different points of the discrete time should remain constant. The latter allows looking at the values of the coefficients of linear prediction as to the values of the random variable corresponding to a particular general population.

Let us now consider the time of launch of the natural circulation while continuous chest compressions are performed. From the viewpoint of pressure measurement, this means that a detectable periodic process is added by the new batch process. For the linear prediction coefficients, this means that the last value calculated after start of the natural circulation, already belongs to another general population. Thus, by storing a set of linear prediction coefficients calculated at various successive time points, we obtain sampled values of a vector random variable, which is uniform only in the event of cardiopulmonary bypass system functioning only. Therefor blood pressure control is possible using a statistical criterion for testing the homogeneity of the sample.

Here is a scheme to test the hypothesis of homogeneity of the sample using the Smirnov N.V. criterion in the case of one-dimensional random variable. σ_N^2 as the last mentioned can be taken from the formula (3).

Suppose there are two independent samples $(x_1', x_2', \dots, x_m')$ and $(x_1'', x_2'', \dots, x_n'')$. We need to verify that both samples are taken from the same continuous general population (in other words that the sample is homogenous). Using these samples we form two empirical distribution functions $F_{1m}(x)$ and $F_{2n}(x)$. If the two samples belong to the same population, the empirical distribution function will be close to the population distribution function, and therefore they are close to each other.

Consider the statistics

$$D_{mn} = \sup_x |F_{1m}(x) - F_{2n}(x)|. \quad (4)$$

There is a statement that if the empirical distribution function is constructed from samples of the same population, than

$$P\left(D_{mn}/\sqrt{1/m + 1/n} < x\right) \to K(x) = \begin{cases} \sum_{k=-\infty}^{+\infty}(-1)^k e^{-2k^2x^2} & x > 0 \\ 0 & x \le 0 \end{cases} \quad (5)$$

with $n \to \infty$, $m \to \infty$; $m/n \to \rho > 0$.

Thus, the verification procedure is to implement the following:

1. Choose the level of significance α.
2. Find the root $K_{1-\alpha}$ of the equation $K(x) = 1 - \alpha$.
3. Determine the sample valueD_B of the statistics D_{mn}.
4. Check the inequality $D_B/\sqrt{1/m + 1/n} < K_{1-\alpha}$. If inequality is satisfied, the hypothesis of homogeneity is accepted at significance level α. Otherwise, the hypothesis is rejected, which means that the appearance of the natural circulation.

Figure 1 shows the output to the optimum frequency mode compressions of ECC 80 beats/min at a depth of compressions 35 mm. In this mode, all the parameters were changed under the direction of the control program.

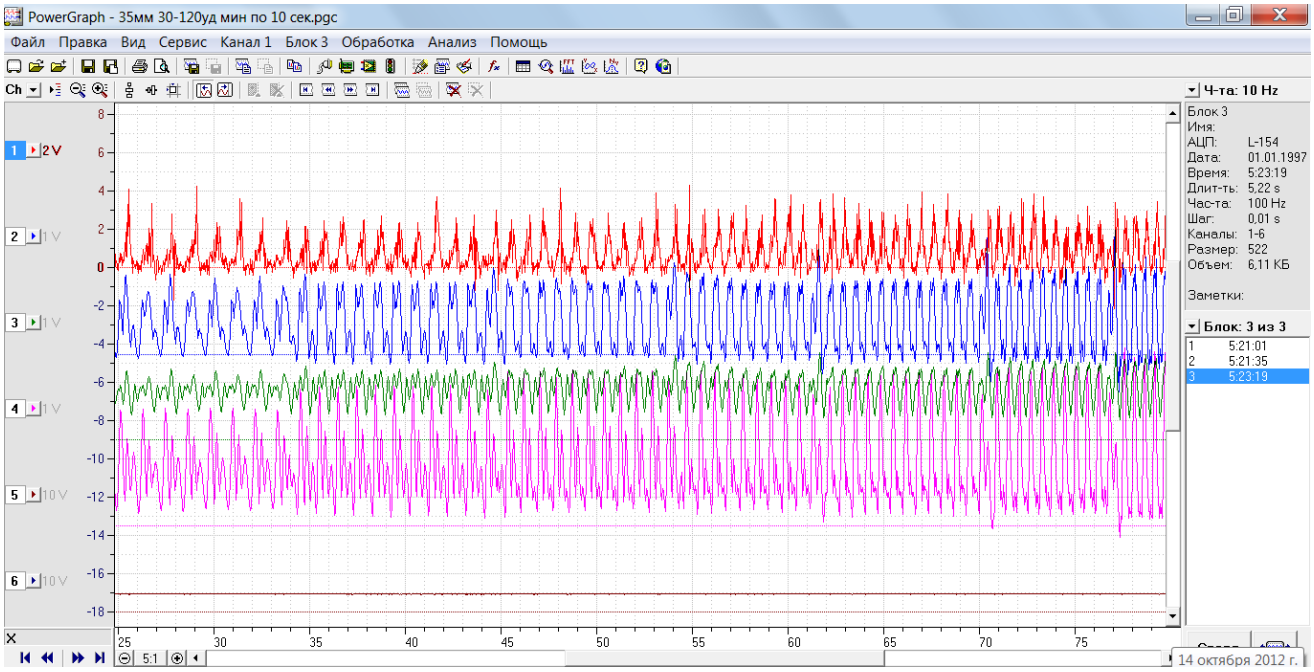


Рисунок 1 – The sensor signals of flow and pressure in the test bench, registered during operation of external cardiac compressor in «adaptive» mode in a phase of «rough» adaptation - selection of the optimal compression rates

Study of ECC at various compression rates showed the presence of minute maximum flow rate and stroke volume at the compression rate of 80 beats/min, which corresponds to the current guidelines for the cardio-pulmonary resuscitation. Because the value of blood pressure is a critical parameter determining the effectiveness of cardiopulmonary resuscutation, chest compressions in particular, development of data processing algorithms on an integral blood pressure to control the compression process using automated ECC is important. Operating algorithms of the ECC of original design developed by the authors have confirmed their performance on the actual measurements in the experimental stand for different values of the depth of compressions.

1. Aman A.A. Biophysical basis of measurement of blood pressure. Saint-Petersburg: Medicina, 1983. – 128 pp.
2. Bokeria L.A., Revishvili A.S., Neminushy N.M. Sudden cardiac death. Moscow, GEOTAR, 2011. – 267 pp.
3. Chugh S.S., Jui J., Gunson K. et al. Current burden of sudden cardiac death: multiple source surveillance versus retrospective death certificate-based review in a large U.S. community // J Am Coll Cardiol. – 2004. – Vol. 44. – P. 1268–1275.
4. Cohen T.J., Goldner B., Maccaro P. et al. A comparison of active compression-decompression cardiopulmonary resuscitation with standard cardiopulmonary resuscitation for cardiac arrests occurring in the hospital // N. Engl. J. Med. 1993. Vol. 329. P. 1918−1921.
5. CohenT.J., TuckerK.J., LurieK.G. etal. Active compression-decompression. A new method of cardiopulmonary resuscitation. Cardiopulmonary Resuscitation Working Group // JAMA. 1992. Vol. 267. P. 2916−2923.
6. FieldJ.M., HazinskiM.F., SayreM.R. etal. Part 1: executive summary: 2010 American Heart Association Guidelines for Cardiopulmonary Resuscitation and Emergency Cardiovascular Care // Circulation. – 2010. – Vol. 122, №18, Suppl. 3. – P. 640–656.
7. Kouwenhoven W.B., Jude J.R., Knickerbocker G.G. Closed-chest cardiac massage // J. Am. Med. Assoc. 1960. Vol. 173. P. 1064−1067.
8. Levine R.L., Wayne M.A., Miller C.C. End-tidal carbon dioxide and outcome of out-of-hospital cardiac arrest // N. Engl. J. Med. 1997. Vol. 337. P. 301−306.
9. Wigginton J.G., Miller A.H., Fernando L. et al. Mechanical devices for cardiopulmonary resuscitation // Curr. Opin. Crit. Care. 2005. Vol. 11. P. 219−223.

К.Ю. Сенчик, В.В. Харламов, В.Ю. Некрасов, Н.А. Грязнов, Г.С. Киреева

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ РАБОТЫ НОВОГО КАРДИОКОМПРЕССОРА ДЛЯ СЕРДЕЧНО-ЛЕГОЧНОЙ РЕАНИМАЦИИ

ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург
k-yurivich@bk.ru

Аннотация

В настоящее время в мировой практике для оптимизации процесса сердечно-легочной реанимации разработаны и используются механические кардиокомпрессоры – устройства, заменяющие человека при проведении ручных манипуляций. В ЦНИИ РТК (Санкт-Петербург, Россия) был разработан и успешно испытан мехатронный автоматический кардиокопрессор, который предлагается использовать для создания автоматического наружного кардиокомпрессора (НКК). В статье приведены результаты экспериментальных исследований проверки работоспособности (определение корректности выполнения заложенных зависимостей и процедур) и надежности (определение частоты ложных срабатываний и выявление возможных ошибок) алгоритмов функционирования мехатронного НКК при различных значениях артериального давления.

Ключевые слова: сердечно-легочная реанимация, автоматический наружный кардиокомпрессор, артериальное давление, математическое моделирование.

Количество людей, погибающих ежегодно в России от внезапной остановки сердца, сравнимо с населением крупного города и составляет порядка 300 000 случаев [1]. По официальной статистике, в Европе и Америке в 1−5 случаях на каждую тысячу госпитализированных пациентов возникает необходимость в оказании мер сердечно-легочной реанимации (СЛР) [3]. СЛР, как правило, не является процедурой, которая возобновляет функции кровообращения и дыхания, но может быть эффективна для сохранения функций кровообращения и дыхания в количестве необходимом для выживания пациента, пока собственные функции кровообращения и дыхания пациента не восстановятся. Безаппаратные методы СЛР в настоящее время являются хорошо разработанными и рутинно применяемыми в практике оказания экстренной помощи больным и пострадавшим, взрослым и детям [9]. Существенным недостатком данного варианта СЛР является невозможность осуществлять эффективную компрессию грудной клетки реаниматором ввиду его быстрого утомления (эффективная работа по компрессии грудной клетки – 3 мин.) [4, 5, 7, 8]. Ограничением применимости ручной компрессии грудной клетки являются проблемы, возникающие при транспортировке больного или пострадавшего. Таким образом, актуальным является разработка аппаратных комплексов, основным компонентом которых является кардиокомпрессор (КК), не только чтобы заменить человека при проведении СЛР, но также для возможности автоматического управления параметрами компрессии в зависимости от физиологических показателей пациента.

В ГНЦ РФ ЦНИИ РТК (Санкт-Петербург, Россия) был разработан и успешно испытан мехатронный автоматический КК, который и будет использован при создании автоматического наружного кардиокомпрессора (НКК). Ниже перечислены основные элементы НКК, которые находятся под контролем программного обеспечения комплекса:

- электропривод с передачей, преобразующей вращательное движение электродвигателя в поступательное движение нагрузочной площадки КК;
- драйвер электропривода;
- набор датчиков для контроля состояния пациента, контроля процесса компрессии и управления (инвазивный датчик давления, неинвазивный датчик давления, датчик нагрузки на грудную клетку, датчик величины компрессии);
- микроконтроллерная система управления с набором интерфейсов, в том числе для подключения дополнительных датчиков и систем;
- дополнительные датчики и системы: допплеровский измеритель скорости кровотока, кардиограф, пульсоксиметрический датчик, датчик температуры тела, система определения частоты дыхания и т.д. (до четырех одновременно);
- устройство индикации и отображения информации;
- устройство ввода информации;
- устройство оповещения;
- вторичный источник электропитания для формирования питания на составные части системы;

- система, состоящая из комплекта манжет для компрессии конечностей с электронно-пневматическим управляемым блоком накачки и датчиками давления (и пульсаций), осуществляющими измерение давления осциллографическим методом;
- автономный источник питания.

Управление, а точнее коррекция закона и параметров управления, происходит по данным со всех подключенных датчиков по предустановленным алгоритмам. В основу алгоритма коррекции положены теоретические выкладки по определению дополнительного кровяного давления (в результате появления сердечной деятельности) на фоне пульсаций давления в результате работы НКК. Представленный алгоритм представляет собой два одновременно выполняемых редуцированных варианта расчетных алгоритмов. Параллельно вычисляются три величины:

- определение разницы измеренных давлений в двух соседних циклах компрессии поточечно, в эквивалентных точках с синхронизацией по времени начала компрессии (положение нагрузочной платформы в верхней точке) и вычисление суммы модулей отклонений;
- определение периода появления максимума дополнительного сигнала для синхронизации с работой КК;
- определение изменения интеграла по периоду компрессии давления в соседних циклах.

Вычисленные величины сравниваются с установленным порогом, и закон нагружения изменяется в сторону уменьшения компрессии и сокращения частоты воздействия. На данном этапе величина изменения установлена эмпирически и оперативно не настраивается. Одновременно на экране появляется пиктограмма восстановления сердечной деятельности (наличие собственного пульса) и подается периодический звуковой сигнал. Для доработки алгоритма до конкретных значений оптимальных параметров компрессии и методики изменения параметров в зависимости от полученных данных о состоянии пациента требуется набор статистики, так как аналогов у разрабатываемого устройства не существует. В основу разработки алгоритмов положены рекомендации Американской Ассоциации Сердца [6].

Структура алгоритмов работы автоматического наружного кардиокомпрессора

К общим рабочим алгоритмам управления подсистемами НКК можно отнести:

- алгоритм самотестирования оборудования;
- алгоритм управления по величине усилия (отслеживание траектории нагружения по прикладываемому усилию с контролем выхода перемещения за максимальную установленную величину);
- алгоритм управления по величине компрессии (отслеживание траектории перемещения с контролем ограничений на прикладываемое усилие);
- алгоритм коррекции параметров компрессии по показаниям датчиков. (данная реализация предусматривает режим коррекции по величине интегрального давления);
- алгоритм регистрации резких изменений траектории (прикладываемого усилия при заданной величине компрессии или величины компрессии при заданной величине усилия), что может быть связано с переломом ребер или восстановлением дыхательных функций;
- алгоритм прерывания на паузу для искусственной вентиляции легких.

Переменные и параметры работы автоматического наружного кардиокомпрессора

Список переменных программы в базовом режиме работы представлен в табл. 1.

Таблица 1.Параметры и константы базового режима

№	Параметр	Единицы измерения	Min/ Max	Шаг Уст.	Описание
1	Частота компрессии	1/мин	30/ 120	10(5*)	Частота повторения циклов компрессия/декомпрессия
2	Частота базовая	1/мин	80	-	Константа
3	компрессия/ декомпрессия	%	10/ 90	10	Соотношение времени компрессия/ декомпрессия
4	Усилие	кгс	0/ 60	5(2*)	Максимальное усилие при управлении по величине усилия
5	Глубина	мм	0/	5(2*)	Величина компрессии грудной

№	Параметр	Единицы измерения	Min/ Max	Шаг Уст.	Описание
	компрессии		60		клетки от точки касания грудины при управлении по величине компрессии
6	Глубина базовая	мм	35	-	Константа
7	Максимальное усилие	кгс	0/ 60	5(2*)	Ограничение на прикладываемое усилие при управлении по величине компрессии
8	Максимальная компрессия	мм	0/ 60	5(2*)	Ограничение на величину компрессии при управлении по усилию
9	Период паузы	ед.циклов компрессии	1/ 50	1	Количество циклов компрессии до начала паузы для вентиляции легких
10	Длительность паузы	сек	0/ 20	5(1*)	Длительность паузы
11	Управление	Логич.	Компр Давл.	выбор	Выбор управления по усилию или величине компрессии
12	Траектория	-	0/ 9	1	Выбор одного из предустановленных законов нагружения

*Точная установка; Min – минимальное значение, Max – максимальное значение.

Разработка алгоритмов обработки информации об интегральном артериальном давлении для контроля процесса компрессии

Целью разработки алгоритма информации об интегральном артериальном давлении является контроль процесса компрессии. Основной задачей алгоритма контроля артериального давления является установление момента запуска механизма естественного кровообращения с целью изменения режима работы кардиокомпрессора. Артериальное давление измеряется непрерывно инвазивным методом, путем регистрации оригинальной измерительной системой объемных артериальных осциллограмм. Как известно, ритмическая деятельность сердца приводит к появлению пульса − периодических колебаний кровенаполнения и кровяного давления в кровеносных сосудах. Датчик артериального давления, связанный с артерией пациента, выдает значение давления в виде непрерывного сигнала, который может быть оцифрован. Полученная таким образом осциллограмма имеет общий характерный рисунок и состоит из отдельных пульсовых волн или осцилляций [2]. В дальнейшем будем предполагать, что измеряемый датчиком давления процесс кровообращения качественно может принимать одно из четырех возможных состояний:

- Нормальное функционирование сердца. Характеризуется периодическим процессом, рассмотренным выше.
- Искусственное кровообращение, создаваемое кардиокомпрессором. Характеризуется периодическим процессом, подобным естественному. Период последнего задается параметрами устройства. На данный процесс могут накладываться фибрилляции, которые носят характер шумовой составляющей и не влияют качественно на общую картину.
- Наложение данных двух процессов. На практике это означает, что на фоне искусственного кровообращения начинает функционировать сердечная мышца в естественном режиме, то есть в организме наблюдается естественное кровообращение. Основной задачей алгоритма контроля артериального давления является установление момента запуска механизма естественного кровообращения с целью изменения режима работы кардиокомпрессора.
- Отсутствие как естественного, так и искусственного кровообращения. Данное состояние отвечает началу проведения реанимационных мероприятий.

Таким образом, в качестве составной части алгоритма возникает задача описания периодического процесса по измеряемой осциллограмме. Рассмотрим периодический дискретный сигнал вида: $x(0), x(1), x(2), \dots x(n), \dots$ Здесь $x(n)$ – отсчеты, соответствующие значениям артериального давления. Поставим задачу предсказания значения $x(n)$ по измеренным предыдущим значениям:

$$x(n-1), x(n-2), x(n-3), \dots x(n-p)$$

Для этого составим линейную комбинацию:

$$\bar{x}(n) = a(1)x(n-1) + a(2)x(n-2) + \cdots + a(p)x(n-p) \quad (1)$$

Здесь $\bar{x}(n)$ – предсказанное значение, $a(1), a(2), \ldots a(p)$ – коэффициенты линейного предсказания.
Ошибка предсказания имеет вид: $e(n) = x(n) - \bar{x}(n)$.
Для среднеквадратичной ошибки предсказания N последовательных импульсов $x(n), \ldots x(n+N-1)$ можем записать:

$$E_N = \sum_{k=0}^{N-1}(e(n+k))^2 = \sum_{k=0}^{N-1}((x(n+k) - \bar{x}(n+k))^2)^2 \quad (2)$$

Значения коэффициентов линейного предсказания получим из условий минимума выражения (2) по $a(1), a(2), \ldots a(p)$:

$$\sigma_N^2 = \min_{a(1),\ldots a(p)} E_N \quad (3)$$

Значение достигнутого минимума σ_N^2 характеризует качество предсказания сигнала. Коэффициенты линейного предсказания могут быть преобразованы в кепстральные коэффициенты или в коэффициенты отражения. Возможно также вычисление систем указанных величин при помощи быстрого преобразования Фурье. В задаче описания процесса контроля артериального давления важно, что для периодического процесса значения коэффициентов линейного предсказания (а также остальных связанных с ними характеристик), вычисленные в различные моменты дискретного времени, должны оставаться постоянными. Последнее обстоятельство позволяет смотреть на значения коэффициентов линейного предсказания, как на значения случайной величины, соответствующее определенной генеральной совокупности.

Рассмотрим теперь момент запуска системы естественного кровообращения на фоне непрерывно производимого непрямого массажа сердца. С точки зрения измерения давления это означает, что к регистрируемому периодическому процессу подмешивается новый периодический процесс. Для коэффициентов линейного предсказания это означает, что значения последних, вычисленные после запуска естественного кровообращения, принадлежат уже другой генеральной совокупности. Таким образом, сохраняя набор коэффициентов линейного предсказания, вычисленных в различные последовательные моменты времени, получаем выборку значений векторной случайной величины, которая является однородной в том и только в том случае, если функционирует лишь система искусственного кровообращения. Следовательно, для контроля артериального давления представляется возможным использовать статистический критерий проверки однородности выборки.

Приведем схему проверки гипотезы об однородности выборки с помощью критерия Н.В. Смирнова для случая одномерной случайной величины. В качестве последней можно выбрать σ_N^2из формулы (3).

Пусть есть две независимые выборки$(x_1', x_2', \ldots, x_m')$ и$(x_1'', x_2'', \ldots, x_n'')$. Требуется проверить, что обе выборки взяты из одной и той же непрерывной генеральной совокупности. Или, что то же самое, объединенная выборка является однородной. Образуем по этим выборкам две эмпирические функции распределения $F_{1m}(x)$ и $F_{2n}(x)$. Если обе выборки принадлежат одной и той же генеральной совокупности, то эмпирические функции распределения будут близки к функции распределения генеральной совокупности, а потому будут близки между собой. Рассмотрим статистику

$$D_{mn} = \sup_x |F_{1m}(x) - F_{2n}(x)|. \quad (4)$$

Имеет место утверждение: если эмпирические функции распределения построены по выборкам одной и той же генеральной совокупности, то

$$P\left(D_{mn}/\sqrt{1/m + 1/n} < x\right) \to K(x) = \begin{cases} \sum_{k=-\infty}^{+\infty}(-1)^k e^{-2k^2x^2} & x > 0 \\ 0 & x \le 0 \end{cases} \quad (5)$$

при $n \to \infty$, $m \to \infty$; $m/n \to \rho > 0$.

Таким образом, процедура проверки сводится к выполнению следующих действий:

1. Выбираем уровень значимости α.
2. Находим корень $K_{1-\alpha}$ уравнения $K(x) = 1 - \alpha$.
3. По выборке определяем выборочное значение D_B статистики D_{mn}.
4. Проверяем выполнение неравенства$D_B/\sqrt{1/m + 1/n} < K_{1-\alpha}$. Если неравенство выполняется, то гипотеза однородности принимается на уровне значимости α. В противном случае гипотеза отвергается, что означает появление естественного кровообращения.

На рисунке 1 показан выход на оптимальный режим частоты компрессий МНК 80 уд/мин при глубине компрессии 35 мм. В данном режиме все параметры менялись под руководством управляющей программы.

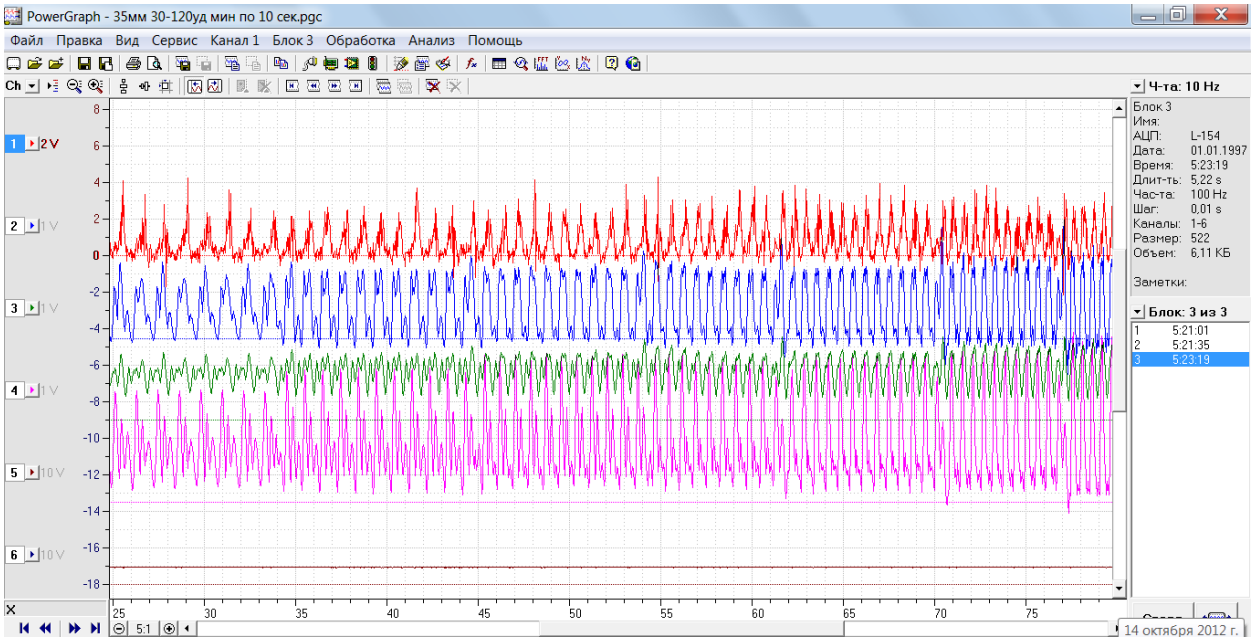


Рисунок 1 – Сигналы датчиков расхода и давлений в экспериментальном стенде, зарегистрированные при работе наружного кардиокомпрессора в режиме «Адаптивный» в фазу «грубой» адаптации – выбора оптимальной частоты компрессий

Исследования работы МНК при различных частотах компрессий показало наличие максимума минутного расхода и ударного объема при частоте компрессий 80 уд/мин, что соответствует современным рекомендациям по проведению сердечно-легочной реанимации (рис. 2). Таким образом, работоспособность предложенного алгоритма обработки информации об интегральном артериальном давлении для контроля процесса компрессии подтверждена экспериментально на основании данных реальных измерений.

1. Эман А.А. Биофизические основы измерения артериального давления.- Л.: Медицина, 1983. – 128с.
2. Бокерия Л.А., Ревишвили А.Ш., Неминущий Н.М. Внезапная сердечная смерть. М.: ГЭОТАР, 2011. – 267 с.
3. Chugh S.S., Jui J., Gunson K. et al. Current burden of sudden cardiac death: multiple source surveillance versus retrospective death certificate-based review in a large U.S. community // J. Am. Coll. Cardiol. – 2004. – Vol. 44. – P. 1268–1275.
4. Cohen T.J., Goldner B., Maccaro P. et al. A comparison of active compression-decompression cardiopulmonary resuscitation with standard cardiopulmonary resuscitation for cardiac arrests occurring in the hospital // N. Engl. J. Med. – 1993. – Vol. 329. – P. 1918−1921.
5. Cohen T.J., Tucker K.J., Lurie K.G. et al. Active compression-decompression. A new method of cardiopulmonary resuscitation. Cardiopulmonary Resuscitation Working Group // JAMA. – 1992. – Vol. 267. – P. 2916−2923.
6. Field J.M., Hazinski M.F., Sayre M.R. et al. Part 1: executive summary: 2010 American Heart Association Guidelines for Cardiopulmonary Resuscitation and Emergency Cardiovascular Care // Circulation. – 2010. – Vol. 122, №18, Suppl. 3. – P. 640–656.
7. Kouwenhoven W.B., Jude J.R., Knickerbocker G.G. Closed-chest cardiac massage // J. Am. Med. Assoc. – 1960. – Vol. 173. – P. 1064−1067.
8. Levine R.L., Wayne M.A., Miller C.C. End-tidal carbon dioxide and outcome of out-of-hospital cardiac arrest // N. Engl. J. Med. – 1997. – Vol. 337. – P. 301−306.
9. Wigginton J.G., Miller A.H., Fernando L. et al. Mechanical devices for cardiopulmonary resuscitation // Curr. Opin. Crit. Care. – 2005. – Vol. 11. – P. 219−223.

T.M. Volosatova, A.M. Marchenkov, N.V. Chichvarin

THE FEATURES OF A COMPUTER VISION WORKBENCH DESIGN BASED ON A KINECT SENSOR

Bauman Moscow State Technical University
tamaravol@gmail.ru
marchenkov.anton@gmail.com
genrih.gertz@gmail.com

Abstract

This article features a detailed description of a developed workbench based on the Kinect sensor for computer vision specialists. The depth map recovery algorithm and its modification are described.

Keywords: computer vision, workbench, depth map, stereo matching, Kinect.

Introduction

Computer vision allows solving a wide range of task in cartography, geodesy, navigation, management, medicine and others. In computer vision it is a standard task to work with 2D images with illumination control. In this area there are many reliable methods. However, sometimes the 2D information is not enough, for example, to control the manipulators, to set up remote control by gestures and to perform a lot of other tasks. In each of the above cases, you have to solve a localization task for certain types of objects in a three-dimensional space [1-5].

Usually computer vision tasks require detailed analysis and selecting an algorithm. Developers have to spend a lot of time analyze and processing the sample cases in various ways, coding standard methods of computer vision to prepare the tests, and the initial measurements of the 3D scene are carried out manually. The aim of this article is to describe a method that allows simplifying the preparatory phase through the creation of a workbench. The workbench includes the Kinect sensor for rapid processing of the depth of the scene.

This article features flowchart of a developed workbench, a detailed description of included modules and computer vision algorithms.

The workbench flowchart

The developed workbench software consists of 6 modules, which can be divided into two main groups: the first group depends on the Kinect sensor, the second group does not depend on it (Fig.1).

Modules included in the first group have the following functions:

- The obtaining a 3D scene description;
- object tracking;
- night vision;
- dynamic computing of the distance.

The second group includes the following modules:

- image matching;
- data defect analysis.

A workbench user selects one of the modules in accordance with his task. If the module does not depend on the Kinect sensor (Fig. 1), it can be disconnected from the system.

The depth map restoration

Typically, the depth map is calculated by comparing a stereo image pair. Stereo matching identifies corresponding pixels in the left and right images, and then the depth can be calculated from the disparities between them. Depth maps obtained by this method contain errors at the boundaries of objects and spike noise.

An alternative of stereo matching is using infrared depth sensors. Depth maps obtained by structured illumination are more accurate, but the IR sensors cannot transmit colors, that's why an additional video camera is required.

Real-time stereo matching requires object boundaries recovering and noise reduction with minimal computational cost. After filtering an unwanted blur can appear at the boundaries. Bilateral filter removes noise while preserving the boundaries, but employing such filter requires a high computational cost, so a modification was proposed, which has a lower computational complexity – the weighted joint bilateral filter [6]. It needs the natural RGB image and a depth map of the scene to work. The filter is defined by the following formula:

$$D_p = \frac{\sum_{S \epsilon N} w(p,s) c(I_p, I_s) R_s D_s}{\sum_{S \epsilon N} w(p,s) c(I_p, I_s) R_s}, \quad (1)$$

$$w(p,s) = \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\|x-y\|}{\sigma_s}\right)\right), \quad (2)$$

$$c(x,y) = \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\|x-y\|}{\sigma_c}\right)\right), \quad (3)$$

where p – the coordinate of the current pixel, s – the coordinates of support pixels centered around pixel p, I – the intensity of the input RGB image, D –the input/output depth map, N –aggregating set of support pixels s, w - spatial kernel weight function, c – color/range weight function. Each weight function is a Gaussian distribution (σ_s, σ_c), R_s – weight map [6].

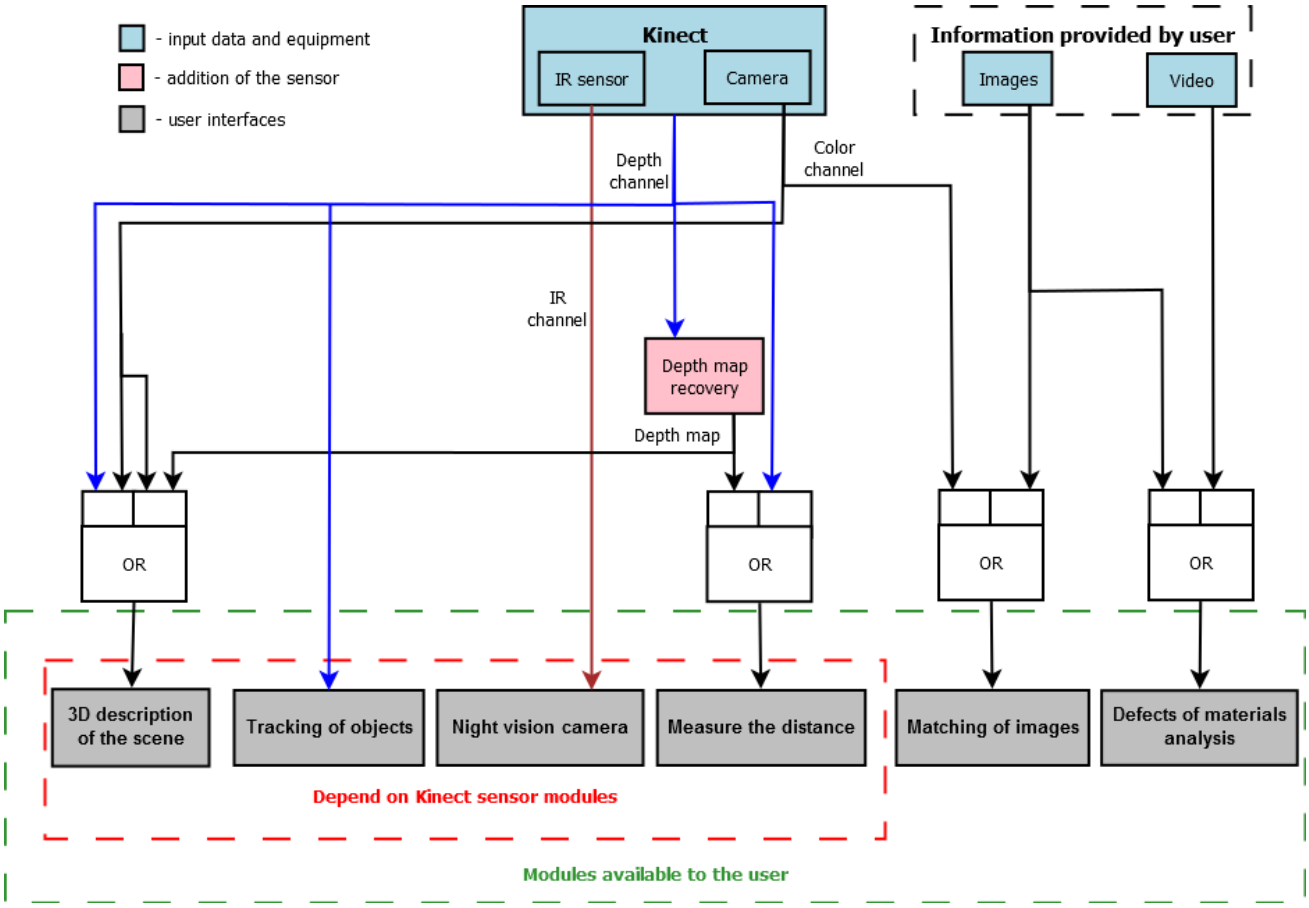


Figure 1 –The workbench flowchart

If the weight map is uniform (e. g., all the values are equal to 1), the weighted filter is converted into the joint bilateral filter.

Formula (1) is divided into two parts: first – weighted kernel (w and c), the other – values of filtering area (R). Weighted map R indicates the importance of the depth value in the pixel, and it is fixed during image filtering. Thus, the maximum weight of the pixel that has the proper depth should be set.

In the case of bilateral combined filter kernel weights the difference between the current pixel on the boundary of the object and a pixel from its area, but on another object, it tends to set average weight on the kernel (due to mixed pixels at the boundary). This is undesirable and will result in a blurring of the boundaries on the weight map. The depth map values on rupture are unreliable, so the weight of the depth value R should be low.

Impulse speckles are also unreliable. Small speckles may be missed regions in the depth map. Such regions should be set to no weight. If such region cannot be ignored, they can be diffused by an anti-aliasing filter. As a result, it is clear that we need to know the weight value for each pixel (weight map R) for soft exclusion of objects boundaries and speckles from the calculations.

In the weight computation process, pixels are classified into those located around object boundaries or away from them, as well as into noise or non-noise ones. The result of this soft classification is represented by the weighting values. During classification the following approaches take into account:

- If there is no boundary between the current pixel and the support pixel, it is considered that the two pixels belong to the same object. This is possible if the depth and color values of the current pixel are similar to the surrounding pixels.
- If the size of related components is small, the region is speckle noised. The difference between the depth values in the related component should be low.

The weight value R at the point determined by:

$$R_s = \sum_{s \in N'} M_s \cdot w(s,q) c(I_s, I_q) \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{\|D_s - D_q\|}{\sigma_r}\right), \quad (4)$$

where q - coordinate of a support pixel centered around the pixel s, N' - a set of support pixels q, $w(s,q)$ and $c(I_s, I_q)$ are the same functions as in (1).

Equation (4) is an additional term that takes into account the difference between the current and support pixel depth values. M_s is a speckle regions mask It has only two weight values - 0 for the speckles and 1 for the real depths.

The first assumption is calculated from the difference between the intensities and depth values between the current pixel and support pixels. The second assumption - the use of speckle masks prepared in accordance with the initial depth map by speckle detection filter. Speckle detection filter has two parameters: the upper threshold of the speckle component size (*speckleWindowSize*) and the permitted difference range in the speckle (*speckleRange*). In the found speckle regions the filter sets 0 to pixels in M. Figure 2 shows speckle map, where if regions contain speckles, their weight is equal to zero, if not, all M values are equal to one. As a result of filtering speckles, boundary regions in the images and in the depth map have small weight. We can softly ignore boundary's depth values and speckle's depth values thus weighted joint bilateral filter with the weight map can reduce boundaries blur, can correct image boundary and reduce the speckle noises. At the brute force filtering, each pixel requires 4 passes (vertical and horizontal filter kernel and vertical and horizontal weight map kernel loops), so the weights map is computed before the weighted joint bilateral filter to improve the computational efficiency [6].

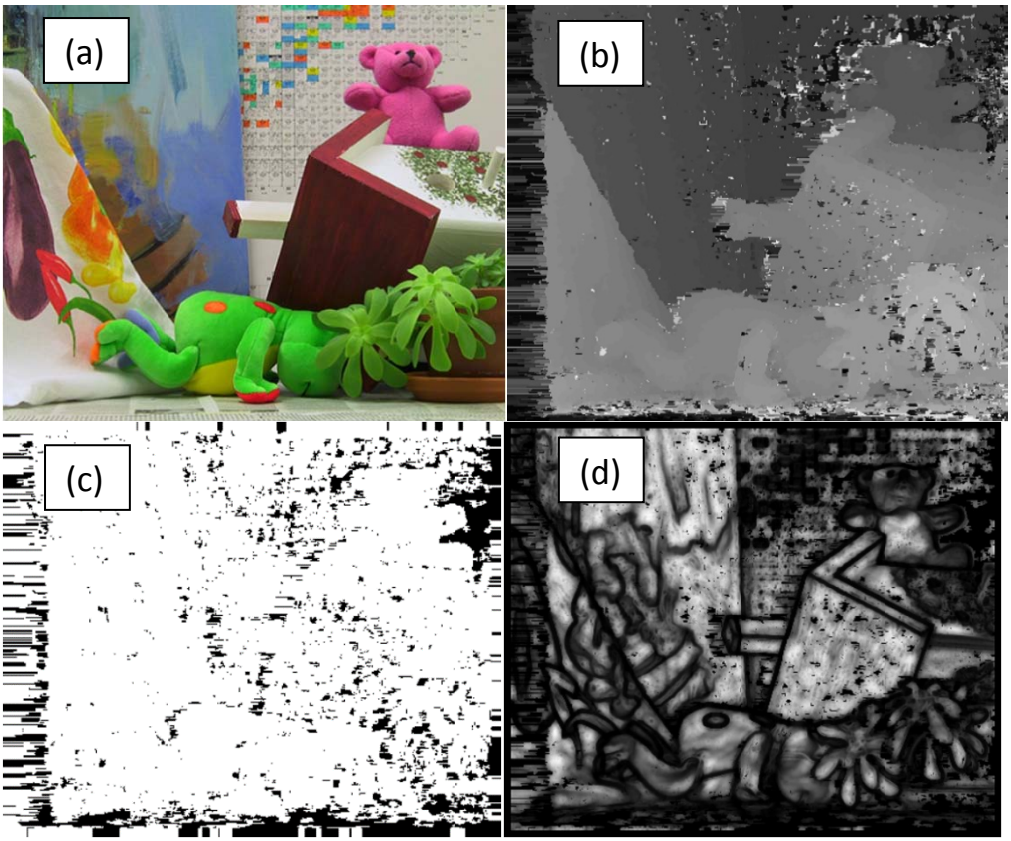


Figure 2 –Weight map example: (a) – input image, (b) – input noisy depth map, (c) – speckles map, (d) – weighted map [6]

The implementation of the algorithm

The specialized computer vision workbench includes a module to remove defects of the depth map. The module is based on the depth map recovery algorithm using weighted joint bilateral filter, implemented on the .NET platform. The stages of its work can be illustrated by the images obtained during the tests.

The input is two images (Fig. 3) – a color picture of the scene and the depth map of the same scene, for example, obtained with Kinect sensor.

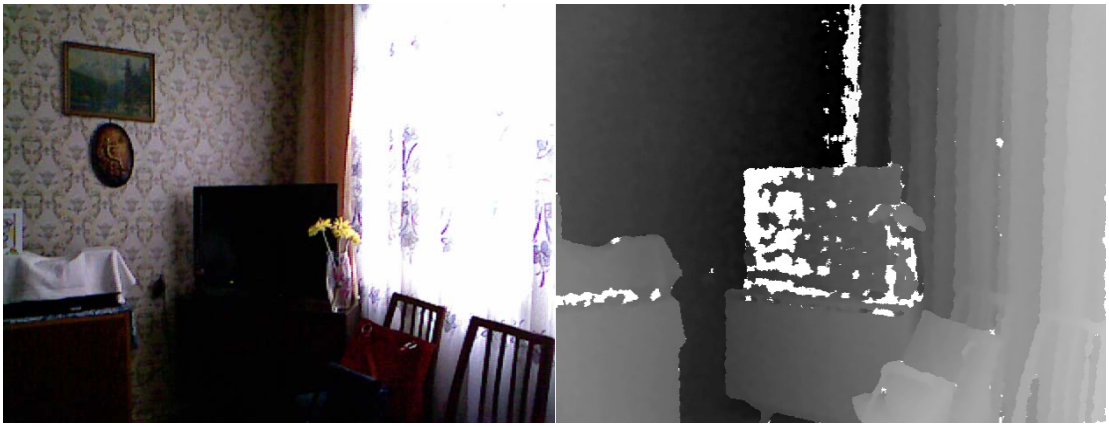


Figure 3 –The input images to the depth map recovery module. Color image of the scene is on the left, depth map is on the right (obtained with Kinect sensor)

Further the workbench generates of a weight map *R* (Fig. 4), which shows the importance of the depth values of pixels in the computation. Speckles are getting the lowest (zero) weight and do not affect the computation of the depth of the support pixels. The result of whole image filtering is the reconstructed depth map (Fig. 4). A significant blurring of boundaries may be noted, thus, for example, the detection of features on the map is very difficult. Then it is necessary to introduce additional processing that eliminates this effect by comparing initial and final values of each pixel. In fact, a result of the processing is equivalent to the case where the bilateral filter passes not over the entire image, but only over the known speckle regions. This approach also reduces the processing time a lot.

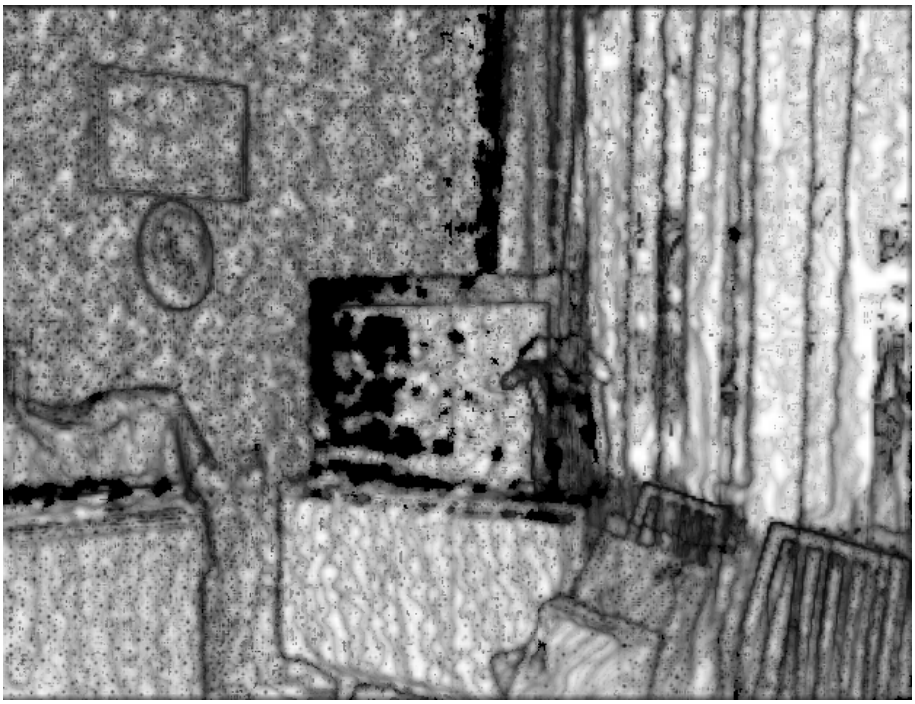


Figure 4 –Weight map generated by the algorithm on the input image (Fig. 3)Computational cost optimization

In its original form the roughly implemented depth map recovery algorithm processes the image for a long time (about 10 minutes on a middle-class laptop), so it needed modification. After the modification of the method in order to process only portions of speckles, the program computation time has decreased in 4.9 times. Then using

the built-in Visual Studio 2012 code performance analysis tools the problem areas have been identified and optimized. The computation time was reduced and it was 40 times shorter than the original.
It is known that most of the image processing methods include loops through a set of pixels in which the it.

Т.М. Волосатова, А.М. Марченков, Н.В. Чичварин

ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО РАБОЧЕГО МЕСТА СИСТЕМ КОМЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ НА ОСНОВЕ СЕНСОРА KINECT

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва
tamaravol@gmail.ru
marchenkov.anton@gmail.com
genrih.gertz@gmail.com

Аннотация

В статье описана структура разработанного автоматизированного рабочего места для специалистов, решающих задачи компьютерного зрения, на основе датчика Kinect. Описан алгоритм восстановления карты глубины сцены и приведен способ оптимизации этого алгоритма.

Ключевые слова: компьютерное зрение, АРМ, карта глубины, стересопоставленение, Kinect.

Введение

Компьютерное зрение позволяет решать широкий круг задач в картографии и геодезии, навигации, управлении, медицине и др. сферах. Зачастую, они сводятся к работе с 2D изображениями при помощи контроля освещенности. В этой области существует множество хорошо изученных методов. Однако иногда 2D информации недостаточно, например, для управления манипуляторами, решения задач дистанционного управления жестами и во многих других приложениях. В каждом из вышеуказанных случаев решается подзадача локализации определенного типа объектов в трехмерном пространстве [1–5].

Обычно задачи компьютерного зрения требуют детального анализа и подбора алгоритма решения. Разработчикам приходится проводить много времени, исследуя и обрабатывая тестовые примеры различными способами. При подготовке тестов приходится проделывать рутинную работу по кодированию стандартных методов технического зрения, а начальные замеры для оценки 3D сцены проводятся, зачастую, вручную. Целью данной работы является разработка метода упрощения подготовительного этапа с помощью создания специализированного автоматизированного рабочего места (АРМ). В состав АРМ включен сенсор Kinect для быстрой обработки глубины сцены.

Ниже приведена схема разработанного АРМ, подробно описан каждый модуль, входящий в его состав, а также использованные алгоритмы компьютерного зрения.

Общая схема АРМ

Программное обеспечение (ПО) специализированного рабочего места включает 6 модулей, которые можно разделить на 2 основные группы: работа которых зависит от наличия сенсора Kinect в системе и не зависящие от сенсора (рис. 1).

К первой группе относятся модули:

- получения 3D описания сцены,
- отслеживания объектов,
- ночного видения,
- динамической оценки расстояния.

Вторая группа включает модули:

- сопоставления изображений,
- анализа дефектов материала.

Пользователь АРМ выбирает для работы один из модулей, в соответствии с поставленной перед ним задачей. Если модуль не зависит от работы сенсора Kinect (см. рис.**Ошибка! Источник ссылки не найден.**), то последний может быть отключен от системы.

Восстановление карты глубины

Обычно карта глубины вычисляется сопоставлением изображений стереопары. Стереосопоставление выделяет соответствующие пиксели на левом и правом снимке, а затем из расхождения между ними вычисляется глубина. Карты глубины, полученные таким методом, содержат ошибки на границах объектов и точечный шум.

Использование инфракрасных сенсоров глубины может служить альтернативой стереосопоставлению. Карты, полученные по структурированной подсветке, отличаются большей

точностью, но при этом ИК-сенсоры не могут передавать цвет сцены, для этого требуется дополнительная камера.

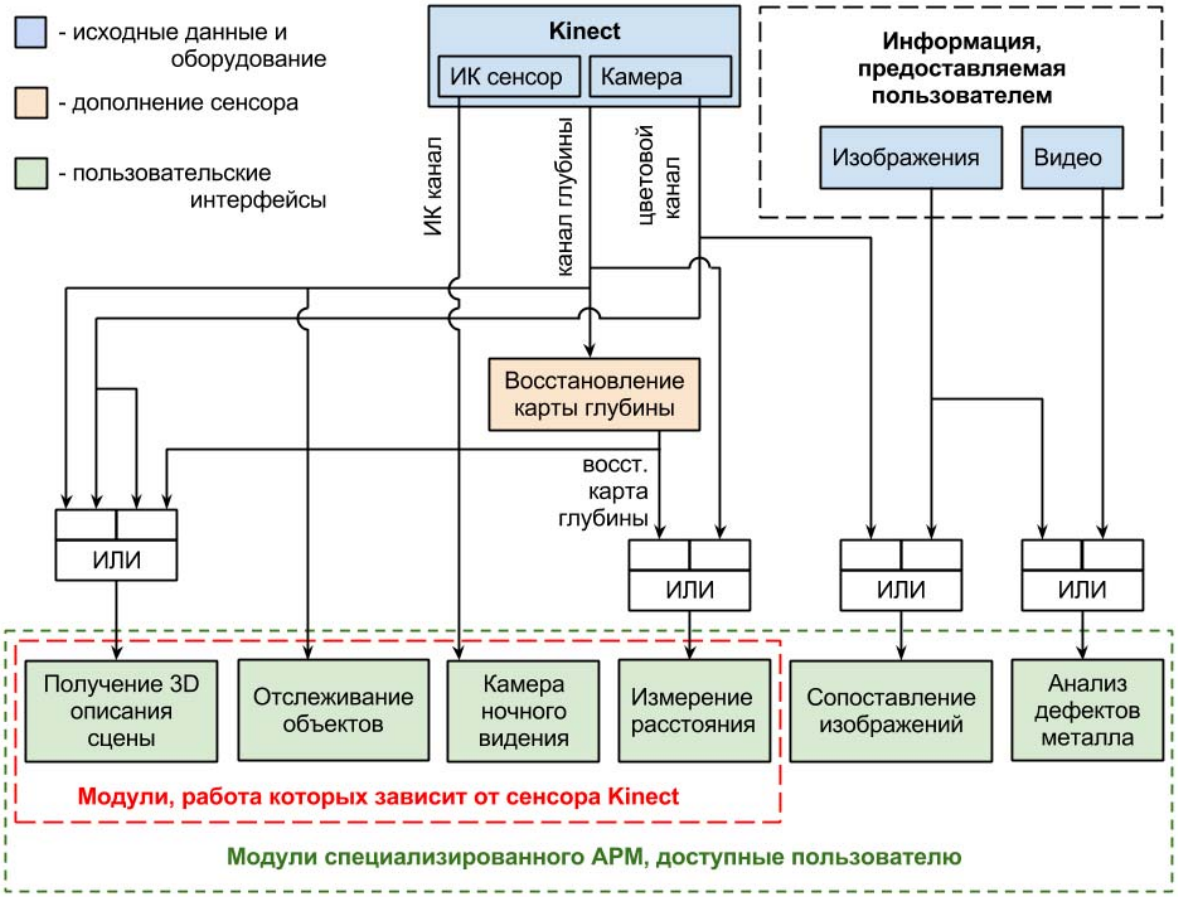


Рисунок 1 –Схема специализированного АРМ компьютерного зрения

Стереовосстановление в режиме реального времени требует восстановления границ объектов и удаления шума с минимальными вычислительными затратами. После фильтрации на границах появляется нежелательное размывание. Двунаправленный фильтр удаляет шум, сохраняя границы, но работа такого фильтра требует больших накладных расходов, поэтому была предложена его модификация, имеющая меньшую вычислительную сложность, - взвешенный объединенный двунаправленный фильтр [6]. Для работы ему необходимо исходное цветное изображение и карта глубины сцены. Фильтр определяется формулой

$$D_p = \frac{\sum_{S \epsilon N} w(p,s) c(I_p, I_s) R_s D_s}{\sum_{S \epsilon N} w(p,s) c(I_p, I_s) R_s}, \quad (1)$$

$$w(p,s) = \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\|x-y\|}{\sigma_s}\right)\right), \quad (2)$$

$$c(x,y) = \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\|x-y\|}{\sigma_c}\right)\right), \quad (3)$$

где p - координаты текущего пикселя, s – координаты окрестных пикселей около p, I – интенсивность входного цветного изображения, D – входная/выходная карта глубины, N- множество точек окрестности, w – взвешенная пространственная функция ядра, c – взвешенная функция цвета. Каждая взвешенная функция есть Гауссово распределение (σ_s, σ_c). R_s – карта весов.

Такой фильтр является эквивалентом простого взвешенного за исключением наличия карты весов. Если карта весов является однородной (например, все веса равны 1), то взвешенный фильтр превращается в простой объединенный двунаправленный фильтр.

Формула (1) разделена на 2 части: одна – взвешенное ядро (*w* и *c*), другая – значения фильтруемой области (*R*). Взвешенная карта *R* обозначает степень значимости глубины в пикселе, и она фиксирована во время фильтрации изображения. Таким образом, должен быть задан максимальный вес в пикселе, который имеет соответствующую глубину.

В случае объединенного двунаправленного фильтра разница веса ядра между текущим пикселем на границе объекта и пикселем из его окрестности, но на другом объекте, стремится к среднему весу по ядру (из-за смешанных пикселей на границе). Это нежелательно и будет приводить к размытию границ на карте весов. Значения на разрывах карты глубины ненадежны, поэтому вес *R*здесь должен быть маленьким.

Также ненадежны импульсные помехи в виде спеклов. Мелкие спеклы могут быть пропусками генерации карты глубины. Такие регионы тоже должны быть отмечены нулевым весом. Если подобные области невозможно игнорировать, то они могут быть уменьшены сглаживающим фильтром. В результате очевидна необходимость заблаговременного задания веса для каждого пикселя (карта весов *R*) для мягкого исключения границ объектов и спеклов из расчетов.

При вычислении карты весов пиксели разделяются на пиксели, расположенные около границ объектов или далеко от них, а также на зашумленные или нет. Результат мягкой классификации представляется значениями весов. Во время классификации учитываются следующие приближения:

- Если граница между текущим пикселем и пикселем окрестности отсутствует, то считается, что оба пикселя принадлежат одному объекту. Подобное возможно в том случае, если значение глубины и цвета текущего пикселя схожи со значениями окрестного.
- Если размер связанной компоненты мал, то регион зашумлен спеклами. Различие значений глубины в связанной компоненте должно быть низким.

Значение веса *R* в точке пределяется:

$$R_s = \sum_{s \in N'} M_s \cdot w(s,q) c(I_s, I_q) \exp\left(-\frac{1}{2}\frac{\|D_s - D_q\|}{\sigma_r}\right), \qquad (4)$$

где *q*- координата пикселя окрестности около пикселя *s*, *N'* – множество пикселей *q*, $w(s,q)$ и $c(I_s, I_q)$ такие же функции как в (1).

Однако, уравнение 0 имеет дополнительный компонент, учитывающий разницу глубин между текущим пикселем и пикселем окрестности – этоM_s, маска регионов спеклов. Она имеет только два значения веса – 0 и 1 для спеклов и действительных глубин соотвественно.

Первое приближение вычисляется по разности интенсивностей и значений глубины между текущим пикселем и пикселем окрестности. Второе приближение – использование маски спеклов, составленной по начальной карте глубины посредством фильтра спеклов. Фильтр спеклов имеет два параметра: верхняя граница размера спекла (*speckleWindowSize*) и допустимая разница глубин (*speckleRange*). Фильтр присваивает пикселям M_s значение 0 в найденных спеклах. Если регионы содержат спеклы, то их вес равен нулю, если нет, то все значения M_s равны единице. Как результат фильтрации спеклов, граничные регионы на изображениях и на карте глубины имеют маленький вес. Мы можем мягко игнорировать глубину границ и глубину спеклов, таким образом, взвешенный двунаправленный фильтр с картой весов может снизить размытие границ, четко корректировать их и уменьшить шум. При грубой фильтрации каждый пиксель требует 4 прохода (вертикальное и горизонтальное фильтрующее ядро и вертикальное и горизонтальное ядро карты весов (см. рис.2)), поэтому вычисляют карту весов перед взвешенным двунаправленным фильтром для повышения эффективности вычислений [6].

Реализация алгоритма

Специализированное АРМ компьютерного зрения включает модуль для удаления дефектов карты глубины. В основе модуля лежит алгоритм восстановления карты глубины с использованием взвешенного двунаправленного кросс-фильтра, реализованный на платформе.NET. Этапы его работы можно проиллюстрировать изображениями, полученными во время тестов.

На вход подаются два изображения (см. рис. 3) – цветная фотография сцены и карта глубины той же сцены, например, полученные с устройства Kinect.

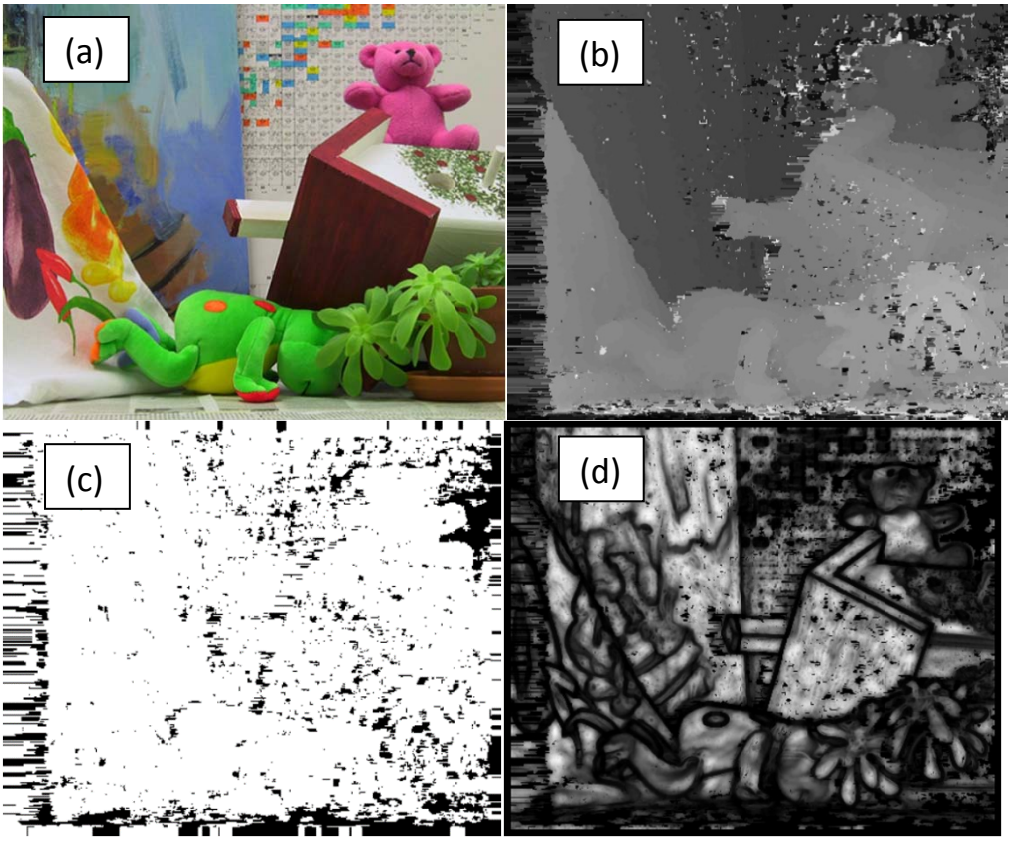


Рисунок 2 –Пример карты весов: (а) – входное изображение, (б) – входная зашумленная карта глубины, (в) – маска спеклов, (г) – взвешенная карта [6]

Рисунок 3 –Входные изображения для модуля восстановления карты глубины: слева – цветной снимок сцены, справа – карта глубины (получены с устройства Kinect)

Далее происходит формирование взвешенной карты *R*(см. рис. 4)

которая отображает степень значимости глубины пикселей в расчетах. Спеклы здесь получают наименьший (нулевой) вес и не влияют на вычисление глубины в окрестных пикселях. После прохода фильтра по всему изображению на выходе получается восстановленная карта глубины, показанная на рис. 4. Здесь можно отметить значимое размытие границ, что сильно затрудняет, например, детектирование особенностей на карте. Тогда необходимо ввести дополнительную обработку, которая исключает этот эффект, сравнивая в каждом пикселе его начальное и конечное значения. По сути, результат такой обработки будет эквивалентен случаю, когда двунаправленный фильтр проходит не по всему изображению, а только по известным участкам спеклов. Такой подход, к тому же, значительно сокращает время обработки.

Рисунок 4 –Взвешенная карта, сформированная алгоритмом по входным изображениям (см. рис. 3)

Оптимизация вычислительных затрат

В первоначальном виде грубо реализованный алгоритм восстановления карты глубины обрабатывает изображение довольно долго (порядка 10 минут на ноутбуке среднего класса), поэтому потребовалась его модификация. После модификации метода, с целью обрабатывать только участки спеклов, время работы программы снизилось в 4,9 раза. Затем с помощью встроенных инструментов анализа производительности Visual Studio 2012 были выявлены проблемные участки кода, и проведена их оптимизация. Время вычислений сократилось и стало в 40 раз меньше первоначального.

Известно, что большинство методов обработки изображений содержат циклические обходы множества пикселей, в которых итерации не связаны между собой. Вышеописанный алгоритм восстановления карты глубины – не исключение. Это значит, что его производительность легко повысить за счет распараллеливания циклов. Библиотека AForge.NET предоставляет такую возможность в виде метода *Parallel.For*. В итоге, после применения всех вышеописанных методов время вычислений уменьшилось в 98 раз.

Заключение

Разработанное АРМ специализированной системы компьютерного зрения позволяет существенно упростить работу инженеров-разработчиков на подготовительном этапе при решении сложных задач технического зрения.

В состав АРМ входит мультикамера Kinect, которая позволяет получать карту глубины обозреваемой сцены, а также цветное видео сцены и видео сцены в инфракрасном излучении в режиме реального времени. Для повышения качества стереовосстановления, производимого мультикамерой, разработан специальный модуль и произведены мероприятия по ускорению его работы.

АРМ предназначено для инженеров, занимающихся решением сложных задач компьютерного зрения, а также будет интересен студентам, которые изучают дисциплины, связанные с робототехникой.

Пользователям АРМ предоставляется возможность динамически получать описания обозреваемой сцены в 3D, отслеживать положение объектов в пространстве, замерять расстояния до участков сцены, получать ее картинку в отсутствии достаточной для обычной камеры освещенности, сопоставлять изображения и анализировать коррозийные дефекты на поверхности материалов.

1. Шапиро Л. Компьютерное зрение / Л. Шапиро, Дж. Стокман // Пер. с англ. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. – 752 с.
2. Trimble 3DWarehouse [электронный ресурс] / (http://sketchup.google.com/3dwarehouse/).
3. Prasad, M. Class-specific 3D localization using constellations of object parts / M. Prasad, J. Knopp, L. Van Gool // BMVC 2011. The 22nd British Machine Vision Conference.- 2011.- С. 34.1 – 34.11.
4. Kinect for Windows Sensor [электронный ресурс] / (http://msdn.microsoft.com/en-us/library/hh855355.aspx).

5. Villamizar, M. Efficient 3D Object Detection using Multiple Pose-Specific Classifiers / M. Villamizar, H. Grabner, F. Moreno-Noguer, J. Andrade-Cetto, L. Van Gool, A. Sanfeliu // BMVC 2011. The 22nd British Machine Vision Conference.- 2011.- C. 20.1 – 20.10.
6. Matsuo T. Weighted Joint Bilateral Filter with Slope Depth Compensation Filter for Depth Map Refinment / Takuya Matsuo, Norishige Fukushima, Yutaka Ishibashi // International Conference on Computer Vision Theory and Application, 2013 – 10 p.

A.A. Ivanov, O.A. Shmakov

INVARIANT DETERMINATION OF INTERNAL GEOMETRY OF A SERPENTINE MANIPULATOR FOR TRAJECTORY LEADING LINK

CRDI RTC, Saint-Petersburg
al_ivanov@rtc.ru

Abstract

The invariant vector representation of the geometry of the snakelike robot manipulator consisting of bodies connected by rotation joints with non-complanar orthogonal axes is proposed. Based on this representation, we obtained explicit expressions for the angle coordinates of the joints via the radius vectors of the centers of the hinges. The representation may be applicable to the manipulator with universal joints. The algorithm for determination of internal geometry of the manipulator in depends of the positions of a points on a smooth curve is described .Theoretical results are been used in planning movements of the hyper redundant manipulator and a snake-like robot in a confined space.

Keywords: hyper redundant manipulator, snake-like robot, inverse problem geometry of the manipulator, motion planning.

А.А. Иванов, О.А. Шмаков

ИНВАРИАНТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВНУТРЕННЕЙ ГЕОМЕТРИИ ЗМЕЕВИДНОГО МАНИПУЛЯТОРА ПО ТРАЕКТОРИИ ЛИДИРУЮЩЕГО ЗВЕНА

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

Аннотация

Предложено инвариантное векторное представление геометрии змеевидного манипулятора, образованного связанными ортогональными некомпланарными шарнирами вращения последовательными звеньями. На основе этого представления получены явные выражения шарнирных координат через радиус-векторы центров шарниров. При специальном выборе геометрических параметров звеньев представление применимо к манипулятору с универсальными шарнирами. Описан алгоритм определения внутренней геометрии манипулятора, при перемещении точек шарниров по гладкой кривой. Теоретические результаты используются при планировании движения гиперизбыточного манипулятора и змеевидного робота в ограниченном пространстве.

Ключевые слова: гиперизбыточный манипулятор, змеевидный робот, обратная задача геометрии манипулятора, планирование движения.

Манипуляторы змеевидного типа (ЗМ) являются представителями класса манипуляторов с существенной избыточностью (гиперизбыточностью) числа управляемых внутренних степеней свободы по отношению к числу внешних координат, определяющих позицию и ориентацию полезной нагрузки в пространстве перемещения. Наименование типа связано с реализуемой в конструкции манипулятора структурой позвоночника змеи. Для технической реализации межпозвоночного сустава в конструкции универсального шарнира используется последовательное соединение трёх тел вращательными кинематическими парами 5-го класса. При этом присутствующая в биологическом прототипе компланарность осей по причине трудности компактной реализации во многих конструкциях ЗМ осознанно не реализуется. В плоском ЗМ кинематическая избыточность возникает при числе шарниров более трёх. В пространственном ЗМ со взаимно ортогональными осями на звене из пар звеньев может быть образована цепь с периодической структурой. Манипулятор с такой кинематической схемой, составленный из трёх и более пар звеньев может осуществлять произвольное пространственное перемещение полезной нагрузки. При соединении более трёх пар манипулятор становиться кинематически избыточным. ЗМ

имеют две сферы применения. Традиционное использование цепи соединённых активно управляемыми шарнирами твёрдых тел с зафиксированным на неподвижном основании корневым звеном для перемещения полезной нагрузки – гиперизбыточный манипулятор (ГИМ) [1]. Использование свободной цепи тел для организации движения по опорным поверхностям – змеевидный робот (ЗР) [2]. Кинематическая избыточность манипулятора позволяет выполнять рабочие операции в сложно структурированном окружении. ЗР подобно своему биологическому прототипу может варьировать локомоционные моды, адаптируясь к условиям перемещения, а также за счёт части не участвующих в локомоциях звеньев, манипулировать полезной нагрузкой. Для выполнения отмеченных функций необходимо задавать в пространстве внешних координат мгновенную форму скелетной линии. Реализация формы осуществляется заданием относительных угловых перемещений звеньев. Внутренние координаты определяются решением обратной задачи кинематики для избыточного манипулятора с ограничениями. Ограничения могут формулироваться в виде равенств, неравенств и критериев оптимальности для внешних и внутренних координат [3]. В работе [4] предложен алгоритм решения обратной задачи кинематики гиперизбыточного манипулятора с ограничениями на внутренние координаты. В работе [10] представление ломаной из отрезков, связанных универсальными шарнирами с компланарными осями.

Абстрактный манипулятор представляет цепь соединённых шарнирами тел (звеньев), каждое из которых имеет не более двух одностепенных шарниров. Из литературы известны различные формы представления кинематических соотношений для манипулятора [3, 5-9]. В настоящей работе предлагается инвариантное к используемой системе координат векторное представление, позволяющее записать соотношения для положений, скоростей и ускорений точек манипулятора в явной зависимости от шарнирных координат и их производных по времени.

Ограничимся рассмотрением манипуляторов с вращательными цилиндрическими шарнирами. Введём последовательную нумерацию цепи из n тел, начиная с первого. Для тела с номером i выделим три точки: C_i - центр связанной с телом системы координат, A_i - точка входа и B_i - точка выхода. На рисунке 1 изображена схема расположения шарниров и их осей в теле.

К точкам A_i и B_i привязаны одностепенные шарниры вращения, направление осей которых неизменно в теле. Положение центра системы координат тела с номером i относительно входной точки и выходной точки относительно центра определим векторами $\overline{\rho}_i$ и $\overline{b}_i$. Тогда $\overline{r}_{Cj}$- положение центра системы координат j-го тела относительно входной точки A_1 первого в цепи тела определяется суммой

$$\overline{r}_{C,j} = \sum_{i=1}^{j} \overline{\rho}_i + \sum_{i=1}^{j-1} \overline{b}_i \,, \tag{1}$$

а $\overline{r}_{Bj}$- положение выходной точки j-го тела относительно входной точки первого в цепи тела определяется суммой

$$\overline{r}_{B,j} = \overline{r}_{C,j} + \overline{b}_j \,. \tag{2}$$

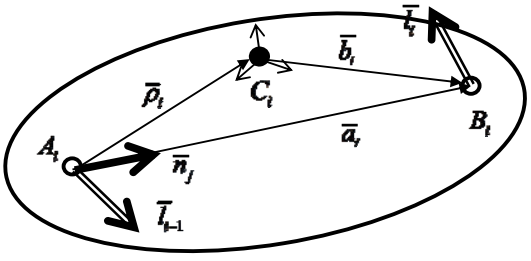


Рисунок 1 – Схема расположения шарниров в звене манипулятора

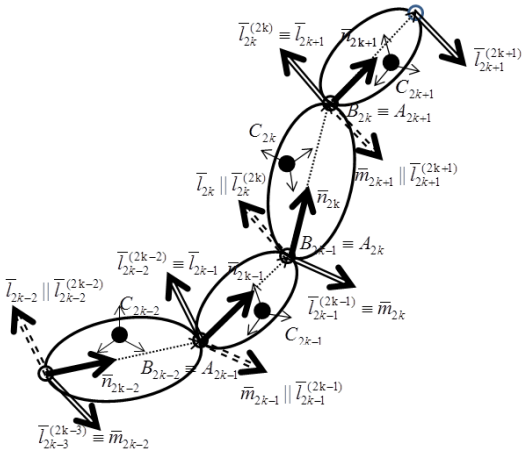


Рисунок 2 – Схема чередования пар звеньев в кинематической цепи

Положение входной точки A_1 первого тела относительно неподвижной системы координат зададим вектором

С учётом введённых обозначений формулы (1) могут быть представлены в рекуррентной форме

$$\overline{r}_{C,j} = \overline{\rho}_j + \overline{b}_{j-1} + \overline{r}_{C,j-1},\ j = \overline{1,n},\ \overline{b}_0 = 0,\ \overline{r}_{C,0} = 0, \tag{3}$$

Абсолютное положение произвольной точки D_i тела i, определяемой вектором $\overline{\rho}_{D,i}$ относительно C_i, задаётся формулой

$$\overline{r}_{D,i} = \overline{\rho}_{D,i} + \overline{r}_{C,i}. \tag{4}$$

Взаимная ориентация соседних тел $i-1$ и i задаётся тензором поворота тела i относительно оси с ортом $\overline{l}_{i-1}^{(i-1)}$, связанным с телом $(i-1)$, на угол φ_i [11]

$$\overline{\overline{Q}}_i^{(i-1)} = \cos\varphi_i\,\overline{\overline{E}} + \sin\varphi_i\,\overline{\overline{E}}\times\overline{l}_{i-1}^{(i-1)} + (1-\cos\varphi_i)\,\overline{l}_{i-1}^{(i-1)}\overline{l}_{i-1}^{(i-1)}. \tag{5}$$

Тензор поворота i-го тела относительно несущего тела с номером (0) равен последовательному произведению тензоров $\overline{\overline{Q}}_i^{(i-1)}$

$$\overline{\overline{P}}_i^{(0)} = \overline{\overline{Q}}_1^{(0)}\cdot\overline{\overline{Q}}_2^{(1)}\cdot\ldots\cdot\overline{\overline{Q}}_{i-1}^{(i-2)}\cdot\overline{\overline{Q}}_i^{(i-1)} = \overline{\overline{P}}_{i-1}^{(0)}\cdot\overline{\overline{Q}}_i^{(i-1)}. \tag{6}$$

Конструкция манипулятора змеевидного типа представляет набор тел с шарнирами, оси которых ортогональны между собой, и соединяющему центры шарниров вектору. Это позволяет представить его через орты осей шарниров $\overline{l}_j$ орты осей на теле j в точках B_j

$$\overline{a}_j = \overline{\rho}_j + \overline{b}_j = -(-1)^j a_j \overline{l}_{j-1}\times\overline{l}_j. \tag{7}$$

Вектор положения точки B_i относительно точки A_1 с учётом (7) запишется в виде

$$\overline{r}_{B,j} = \sum_{i=1}^{j}\overline{a}_i = -\sum_{i=1}^{j}(-1)^i a_i\overline{l}_{i-1}\times\overline{l}_i = \overline{r}_{B,j-1} - (-1)^j a_j\overline{l}_{j-1}\times\overline{l}_j. \tag{8}$$

Представление рекуррентной связи (8) в выделенном базисе через шарнирные углы текущего соединения с учётом обозначения (7) имеет вид

$$\overline{r}_{B,j} = \overline{r}_{B,j-1} - (-1)^j a_j\overline{\overline{P}}_{j-1}^{(0)}\cdot\overline{\overline{Q}}_j^{(j-1)}\cdot(\overline{l}_{j-1}^{(j)}\times\overline{l}_j^{(j)}) \tag{9}$$

или с учётом выражения для тензора поворота относительно оси входного шарнира (5)

$$\overline{r}_{B,j} = \overline{r}_{B,j-1} + (-1)^{j-1}a_j\overline{\overline{P}}_{j-1}^{(0)}\cdot(\cos\varphi_j\,(\overline{l}_{j-2}^{(j-1)}\times\overline{l}_{j-1}^{(j-1)}) - \sin\varphi_j\overline{l}_{j-1}^{(j-1)}). \tag{10}$$

При заданном наборе шарнирных углов $\{\varphi_j\}$ положения центров выходных шарниров относительно несущего тела определяются по формулам (10) через пять независимых внутренних постоянных для тела j параметров a_j, $\overline{l}_{j-1}^{(j)}$ и $\overline{l}_j^{(j)}$, шарнирный угол φ_j, тензор поворота предшествующего тела относительно выделенного базиса $\overline{\overline{P}}_{j-1}^{(0)}$ и вектор $\overline{r}_{Bj-1}$ абсолютного положения центра выходного шарнира предшествующего тела.

Конструкция змеевидного манипулятора имеет периодическую структуру. Периодическим элементом является модуль, состоящий из двух смежных тел с парами ортогональных шарниров. На рисунке 2 приведена схема фрагмента кинематической структуры змеевидного манипулятора.

Выражение для тензора поворота тела с номером j относительно тела $j-2$ через орты осей выходных шарниров тел $j-2$ и $j-1$ с учётом формулы (5) имеет вид

$$\overline{\overline{Q}}_{j-1}^{(j-2)}\cdot\overline{\overline{Q}}_{j}^{(j-1)}=\cos\varphi_{j-1}\,\overline{l}_{j-1}^{(j-1)}\,\overline{l}_{j-1}^{(j-1)}+$$
$$+\sin\varphi_j\sin\varphi_{j-1}(\overline{\overline{E}}\times\overline{l}_{j-2}^{(j-2)})\cdot(\overline{\overline{E}}\times\overline{l}_{j-1}^{(j-1)})+$$
$$+\cos\varphi_j\ \sin\varphi_{j-1}(\overline{\overline{E}}\times\overline{l}_{j-2}^{(j-2)}-(\overline{\overline{E}}\times\overline{l}_{j-2}^{(j-2)})\cdot\overline{l}_{j-1}^{(j-1)}\ \overline{l}_{j-1}^{(j-1)})+$$
$$+\cos\varphi_j\overline{l}_{j-2}^{(j-2)}\,\overline{l}_{j-2}^{(j-2)}+\sin\varphi_j\overline{l}_{j-2}^{(j-2)}\,\overline{l}_{j-2}^{(j-2)}\cdot(\overline{\overline{E}}\times\overline{l}_{j-1}^{(j-1)})+$$
$$+\sin\varphi_{j-1}(\overline{\overline{E}}\times\overline{l}_{j-2}^{(j-2)})\cdot\overline{l}_{j-1}^{(j-1)}\,\overline{l}_{j-1}^{(j-1)}+$$
$$+\sin\varphi_j\cos\varphi_{j-1}(\overline{\overline{E}}\times\overline{l}_{j-1}^{(j-1)}-\overline{l}_{j-2}^{(j-2)}\,\overline{l}_{j-2}^{(j-2)}\cdot(\overline{\overline{E}}\times\overline{l}_{j-1}^{(j-1)}))+$$
$$+\cos\varphi_j\cos\varphi_{j-1}(\overline{\overline{E}}-\overline{l}_{j-1}^{(j-1)}\,\overline{l}_{j-1}^{(j-1)}-\overline{l}_{j-2}^{(j-2)}\,\overline{l}_{j-2}^{(j-2)}). \qquad (11)$$

Для последовательности поворотов относительно двух ортогональных осей, соответствующих углам курса (первый поворот вокруг орта $\overline{l}_{2k-2}$) и тангажа (второй поворот вокруг орта $\overline{m}_{2k-1}$), формула (11) имеет инвариантное представление

$$\overline{\overline{Q}}_{2k}^{(2k-2)}(\varphi_{2k-1},\varphi_{2k})=\overline{\overline{Q}}_{2k-1}^{(2k-2)}\cdot\overline{\overline{Q}}_{2k}^{(2k-1)}=$$
$$=\cos\varphi_{2k}\overline{l}_{2k-2}\overline{l}_{2k-1}+\ \sin\varphi_{2k}\overline{l}_{2k-2}\overline{n}_{2k-1}+$$
$$+\sin\varphi_{2k-1}\sin\varphi_{2k}\overline{m}_{2k-2}\,\overline{l}_{2k-1}+\cos\varphi_{2k-1}\overline{m}_{2k-2}\overline{m}_{2k-1}-\sin\varphi_{2k-1}\cos\varphi_{2k}\,\overline{m}_{2k-2}\overline{n}_{2k-1}+$$
$$-\ \cos\varphi_{2k-1}\sin\varphi_{2k}\ \overline{n}_{2k-2}\overline{l}_{2k-1}+\sin\varphi_{2k-1}\overline{n}_{2k-2}\overline{m}_{2k-1}+\cos\varphi_{2k-1}\cos\varphi_{2k}\ \overline{n}_{2k-2}\overline{n}_{2k-1}, \qquad (12)$$

в котором коэффициенты при диадных (декартовых) произведениях ортов соответствуют компонентам матрицы поворота в самолётных углах Эйлера: курса $\psi\equiv\varphi_{2k-1}$ и тангажа $\vartheta\equiv\varphi_{2k}$.

Орты $\overline{n}_{2k-2}$ и $\overline{n}_{2k-1}$ определяются через орты входных $\overline{l}_{2k-3}^{(2k-2)}$, $\overline{l}_{2k-2}^{(2k-1)}$ и выходных шарниров $\overline{l}_{2k-2}^{(2k-2)}$, $\overline{l}_{2k-1}^{(2k-1)}$ тел $(2k-2)$ и $2k$

$$\overline{n}_{2k-2}=\overline{l}_{2k-2}\times\overline{m}_{2k-2}=\overline{l}_{2k-2}^{(2k-2)}\times\overline{l}_{2k-3}^{(2k-2)}, \qquad (13)$$
$$\overline{n}_{2k-1}=\overline{l}_{2k-1}\times\overline{m}_{2k-1}=\overline{l}_{2k-1}^{(2k-1)}\times\overline{l}_{2k-2}^{(2k-1)}. \qquad (14)$$

Верхний индекс в обозначениях формул (13-14) введён для явного указания номера связанной с телом системы координат представления ортов.

Связь положений точек B_j и B_{j-2} двухзвенного модуля в базисе, связанном с телом номер $(j-2)$ имеет вид

$$\overline{\overline{P}}_{0}^{(j-2)}\cdot(\overline{r}_{B,j}-\overline{r}_{B,j-2})=(\overline{r}_{Bj}^{(j-2)}-\overline{r}_{B,j-2}^{(j-2)})=$$
$$=\left(\cos\varphi_{j-1}\,\overline{\overline{E}}+\sin\varphi_{j-1}\,\overline{\overline{E}}\times\overline{l}_{j-2}^{(j-2)}+(1-\cos\varphi_{j-1})\,\overline{l}_{j-2}^{(j-2)}\,\overline{l}_{j-2}^{(j-2)}\right)$$
$$\cdot\left(a_{j-1}(\overline{l}_{j-2}^{(j-1)}\times\overline{l}_{j-1}^{(j-1)})-a_j(\cos\varphi_j\,(\overline{l}_{j-2}^{(j-1)}\times\overline{l}_{j-1}^{(j-1)})-\sin\varphi_j\overline{l}_{j-1}^{(j-1)})\right) \qquad (15)$$

и представляет векторную запись положения точки B_j относительно B_{j-2} на поверхности тора с расстоянием a_{j-1} до оси вращения с ортом $\overline{l}_{j-2}^{(j-2)}$ и радиусом вращаемой окружности a_j.

Проекции равенства (15) на орты базиса, связанного с $(j-2)$-ым телом и ортами его шарниров, дают скалярные соотношения между шарнирными углами и положением точки на поверхности тора

$$(-1)^j\ \sin\varphi_j a_j=\overline{l}_{j-2}^{(j-2)}\cdot(\overline{r}_{Bj}^{(j-2)}-\overline{r}_{Bj-2}^{(j-2)}), \qquad (16)$$
$$-(-1)^j\sin\varphi_{j-1}(a_{j-1}+a_j\cos\varphi_j)=\overline{l}_{j-3}^{(j-2)}\cdot(\overline{r}_{Bj}^{(j-2)}-\overline{r}_{Bj-2}^{(j-2)}), \qquad (17)$$
$$(-1)^j\cos\varphi_{j-1}(a_{j-1}+a_j\cos\varphi_j)=(\overline{l}_{j-3}^{(j-2)}\times\overline{l}_{j-2}^{(j-2)})\cdot(\overline{r}_{Bj}^{(j-2)}-\overline{r}_{Bj-2}^{(j-2)}). \qquad (18)$$

Из равенств (16-18) вытекают ограничения для радиус-вектора $(\overline{r}_{B,j}^{(j-2)}-\overline{r}_{B,j-2}^{(j-2)})$

$$|\overline{l}_{j-2}^{(j-2)}\cdot(\overline{r}_{B,j}^{(j-2)}-\overline{r}_{B,j-2}^{(j-2)})|\le a_j,$$
$$|\overline{l}_{j-3}^{(j-2)}\cdot(\overline{r}_{B,j}^{(j-2)}-\overline{r}_{B,j-2}^{(j-2)})|\le|(a_{j-1}+\sqrt{a_j{}^2-(\overline{l}_{j-2}^{(j-2)}\cdot(\overline{r}_{B,j}^{(j-2)}-\overline{r}_{B,j-2}^{(j-2)}))^2})|,$$
$$|(\overline{l}_{j-3}^{(j-2)}\times\overline{l}_{j-2}^{(j-2)})\cdot(\overline{r}_{B,j}^{(j-2)}-\overline{r}_{B,j-2}^{(j-2)})|\le|(a_{j-1}+\sqrt{a_j{}^2-(\overline{l}_{j-2}^{(j-2)}\cdot(\overline{r}_{B,j}^{(j-2)}-\overline{r}_{B,j-2}^{(j-2)}))^2})|. \qquad (19)$$

При записи неравенств (19) сделано допущение $\varphi_j \in [-\pi/2, \pi/2]$, которое, как правило, выполняется в конструкции модулей змеевидных манипуляторов.

Из равенств (16-18) вытекают однозначные выражения для шарнирных углов через радиус-вектор $(\overline{r}_{Bj}^{(j-2)} - \overline{r}_{Bj-2}^{(j-2)})$

$$\sin\varphi_j = (-1)^j \overline{l}_{j-2}^{(j-2)} \cdot (\overline{r}_{B,j}^{(j-2)} - \overline{r}_{B,j-2}^{(j-2)}) / a_j, \tag{20}$$

$$\mathrm{tg}\varphi_{j-1} = -\overline{l}_{j-3}^{(j-2)} \cdot (\overline{r}_{B,j}^{(j-2)} - \overline{r}_{B,j-2}^{(j-2)}) / (\overline{l}_{j-3}^{(j-2)} \times \overline{l}_{j-2}^{(j-2)}) \cdot (\overline{r}_{B,j}^{(j-2)} - \overline{r}_{B,j-2}^{(j-2)}), \tag{21}$$

а также неявное представление части поверхности тора для $\varphi_j \in [-\pi/2, \pi/2]$

$$F(\overline{r}_{B,j}^{(0)}) = {a_{j-1}}^2 + {a_j}^2 - (\overline{r}_{B,j}^{(0)} - \overline{r}_{B,j-2}^{(0)}) \cdot (\overline{r}_{B,j}^{(0)} - \overline{r}_{B,j-2}^{(0)}) + 2a_{j-1}\sqrt{{a_j}^2 - (\overline{l}_{j-2}^{(0)} \cdot (\overline{r}_{B,j}^{(0)} - \overline{r}_{B,j-2}^{(0)}))^2} = 0. \tag{22}$$

Соотношения (20-21) позволяют определить шарнирные координаты змеевидного манипулятора, шарниры $j-1$ и j которого лежат на заданной пространственной кусочно-гладкой кривой.

Пусть $\overline{R} = \overline{R}(s)$ - параметрически заданная кривая. Параметр s изменяется от нуля до s_f, $\overline{r}_{B,2n-2k}^{(0)} = \overline{R}(s_k)$, $s_0 = 0$. Значение параметра s_k, соответствующего точке шарнира с номером $j = 2k$, может быть найдено из уравнения вида (22)

$$F(\overline{R}(s_k)) = {a_{2k-1}}^2 + {a_{2k}}^2 - (\overline{R}(s_k) - \overline{R}(s_{k-1})) \cdot (\overline{R}(s_k) - \overline{R}(s_{k-1})) + \\ + 2a_{2k-1}\sqrt{{a_{2k}}^2 - (\overline{l}_{2k-2}^{(0)} \cdot (\overline{R}(s_k) - \overline{R}(s_{k-1})))^2} = 0. \tag{23}$$

Алгоритм для нахождения решения уравнения (23) по методу Ньютона имеет вид

$$\Delta s_0 = a_{2k-1} + a_{2k},$$

$$enter: \tilde{s} = s_{k-1} + \Delta s_0, \tilde{r} = \overline{R}(\tilde{s}), \tilde{r}' = \overline{R}'(\tilde{s}), \Delta\overline{R} = \tilde{r} - \overline{r}_{B2k-2}, \Delta R_l = \overline{l}_{2k-2}^{(0)} \cdot \Delta\overline{R},$$

$$\Delta s = \frac{a_{2k-1}^2 + a_{2k}^2 - \Delta\overline{R} \cdot \Delta\overline{R} + 2a_{2k-1}\sqrt{a_{2k}^2 - (\Delta R_l)^2}}{2\left(\Delta\overline{R} + a_{2k-1}\overline{l}_{2k-2}\Delta R_l / \sqrt{{a_{2k}}^2 - (\Delta R_l)^2}\right) \cdot \tilde{r}'},$$

$$\mathrm{IF}(|\Delta s - \Delta s_0| \le \varepsilon : s_k = s_{k-1} + \Delta s; \overline{r}_{B2k} = \overline{R}(s_k), \Delta s_0 = \Delta s; \mathrm{goto}\, enter). \tag{24}$$

Шарнирные углы определяются по найденному положению точки B_{2k} на заданной кривой

$$\varphi_{2k} = \arcsin(\overline{l}_{2k-2}^{(0)} \cdot (\overline{r}_{B2k}^{(0)} - \overline{r}_{B2k-2}^{(0)}) / a_{2k}), \tag{25}$$

$$\varphi_{2k-1} = -\mathrm{arctg}(\overline{l}_{2k-3}^{(0)} \cdot (\overline{r}_{B2k}^{(0)} - \overline{r}_{B2k-2}^{(0)}) / (\overline{l}_{2k-3}^{(0)} \times \overline{l}_{2k-2}^{(0)}) \cdot (\overline{r}_{B2k}^{(0)} - \overline{r}_{B2k-2}^{(0)})). \tag{26}$$

Полученные уравнения могут быть применены для планирования маршрута движения ГИМ на подвижном основании внутри узкого канала. В исходном положении параметрическая зависимость $\overline{R} = \overline{R}(s)$ может быть построена в виде дифференцируемого интерполяционного сплайна по множеству точек $\{\overline{r}_{B,2k}^{(0)}\}$, совпадающих с входными узлами двухстепенных модулей манипулятора, полученным по известным внутренним координатам из формул (9). Зададим $\overline{r}_g^{(0)}$ - новое положение точки B_{2n}, принадлежащей лидирующему звену манипулятора. Построим интерполирующий сплайн $\overline{R} = \overline{R}(s; \{\{\overline{r}_{B,2k}^{(0)}\}, \overline{r}_g^{(0)}\})$ на основе множества $\{\{\overline{r}_{B,2k}^{(0)}\}, \overline{r}_g^{(0)}\}$. Найдём новый набор углов из формул (22,25,26) и новое множество точек $\{\overline{r}_{B,2k}^{(0)}\}$. Точка $\overline{r}_{B,0}^{(0)}$ будет соответствовать новому положению расположенного на подвижном основании входного шарнира корневого модуля. Повторяя процедуру, получим маршрут движения ГИМ по траектории, которая формируется выбором направления и позиции лидирующего звена.

Описанная процедура планирования маршрута движения ГИМ применима для планирования движения ЗР в среде с препятствиями в локомоционной моде, реализуемой с помощью бегущей к лидирующему звену волны изгибаний в перпендикулярном опорной плоскости направлении [2].

Предложено инвариантное описание геометрии кинематически избыточного манипулятора периодической структуры. Получена инвариантная форма решения геометрической обратной задачи кинематики для манипулятора с расположенными на гладкой кривой шарнирами двухстепенного модуля. Варианты итерационного алгоритма решения уравнения для определения положения точек

входных шарниров модуля представлены в явной форме. Алгоритм применяется для оперативного планирования при управлении движением ГИМ и ЗР [1,2].

1. Иванов А.А. и др. Модульный гиперизбыточный манипулятор: архитектура, алгоритмы управления, реализация //Робототехника и техническая кибернетика, №2 (3), 2014, Издательство: ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург. - С. 55-60
2. Иванов А.А., Шмаков О.А., Демидов Д.А. Змеевидный робот ЗМЕЕЛОК-3 и экспериментальное исследование его локомоций//Научно-технические ведомости СПбГПУ. Серия "Информатика. Телекоммуникации. Управление". Выпуск 1(164). 2012 СС.132-138
3. Springer Handbook of Robotics/Siciliano, Bruno; Khatib, Oussama (Eds.)//Springer, 2008, LX, 1611p.
4. 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 . С.112-118
5. Фу К., Гонсалес Р., Ли К. Робототехника / Пер. с англ. // Москва: Мир, 1989. — 624 с.
6. Zinkovsky A.V., Sholuha V.A., Ivanov A.A. Mathematical Modelling and Computer Simulation of Biomechanical Systems//Singapore, World Scientific Publishing, 1997, 216p.
7. Иванов А.А., Шолуха В.А.Модели опорно-двигательного аппарата человека и животных. В кн.: Математические модели и компьютерное моделирование в биомеханике: учебное пособие. – Под ред. Пальмова В.А. и Зинковского А.В., СПб.: Изд-во Политехн. ун-та. 2004.- С.119-154
8. Кулаков Ф.М., Новаченко С.И., Павлов В.А. Динамическая модель робота. В кн.: Теория, принципы устройства и применение роботов и манипуляторов, Л.: ЛПИ, 1974, с.123-126
9. Зенкевич С.Л., Ющенко А.С. Основы управления манипуляционными роботами: Учебник для вузов. – 2-е изд., исправ. и доп. Москва: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. – 480 с
10. Andersson S.B. Discretization of a continuous curve. *IEEE Transaction on robotics*, 2008, vol.24, No.2, pp.456-461
11. Жилин П.А. Теоретическая механика. Фундаментальные законы механики. Учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГПУ. 2003. 340 с.

S.L. Gerasuto[1], R.A. Prakapovich[2], V.A. Sychev[3]

INVESTIGATION OF WORK CONTROL SYSTEM PROTOTYPE OF SMALL-SIZED MOBILE INTERNET-ROBOT FOR THE «SMART HOUSE» MONITORING TASK

United Institute of Informatics Problems (UIIP)
[1]contacts@robotics.by, [2]rprakapovich@robotics.by, [3]vsychyov@robotics.by

Abstract

The article examines aspects of the control system of the small-size Internet-robot prototype solution for monitoring tasks in the 'smart house' systems. One of possible variants of operating decisions on the basis of IoT Wi-Fi module SoC ESP8266 for mobile robot control through the WebSocket protocol (RFC 6455) Internet, if network support is provided and allowed network traffic of HTTP/2 standard (RFC 7540).

Keywords: Internet-robots, WebSocket, IoT SoC ESP8266, «Smart house».

С.Л. Герасюто[1], Г.А. Прокопович[2], В.А. Сычёв[3]

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОТОТИПА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МАЛОГАБАРИТНЫМ МОБИЛЬНЫМ ИНТЕРНЕТ-РОБОТОМ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ МОНИТОРИНГА В СИСТЕМАХ «УМНЫЙ ДОМ»

Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси, сектор робототехники лаборатории моделирования самоорганизующихся систем, Минск
[1]contacts@robotics.by, [2]rprakapovich@robotics.by, [3]vsychyov@robotics.by

Аннотация

В статье исследованы аспекты работы прототипа системы управления малогабаритным интернет-роботом для решения задач мониторинга в системах ‘умный дом’. Предложен один из возможных вариантов работающего решения на базе IoT Wi-Fi модуля SoC ESP8266 компании Espressif по

управлению мобильными роботами посредством протокола WebSocket (RFC 6455) сети Интернет при условии, что сеть провайдера поддерживает и пропускает сетевой трафик стандарта HTTP/2 (RFC 7540).

Ключевые слова: Интернет-роботы, WebSocket, IoT SoC ESP8266, «Умный дом».

Введение

Стремительное развитие сверхбольших интегральных схем ASIC (СБИС) к «системам на кристалле» (SoC) раскрывает новые возможности по созданию систем управления робототехническими аппаратами. Робототехникам стали доступны возможности организовывать сразу на одном кристалле функционирование компьютера, который способен работать как с цифровыми, так и аналоговыми и аналого-цифровыми сигналами, а также частотами радиодиапазона. На текущий момент для малогабаритных мобильных роботов эти гибридные микросхемы являются главной аппаратной платформой на ближайшую перспективу до появления чипов на основе новых физических принципов [1].

Ключевым фактором выбора и использования SoC для построения систем управления малогабаритными робототехническими аппаратами является отношение стоимости микросхемы к стоимости самого робота. На текущий момент — это менее 5% от цены всего робота при мелкосерийном производстве SoC потребляют меньше энергии, стоят дешевле и работают надёжнее, чем наборы микросхем с той же функциональностью.

Наиболее востребованной сферой применения мобильных малогабаритных роботов на ближайшую перспективу является их использование в системах “Умный дом” для решения задач мониторинга и поддержания состояния жилого помещения. Причем оптимально использование именно группы роботов с включением в неё одного интеллектуального антропоморфного робота для взаимодействия непосредственно с человеком, который будет еще и обладать возможностями манипулирования предметами.

Целью данной работы является исследование работы прототипа системы управления малогабаритным мобильным роботом, построенным на базе SoCESP8266. Рассмотреть проблемы создания Интернет-роботов, функционирующих в обычных сетях Internet с учетом ограничений и возможностей провайдеров по предоставлению каналов доступа к Сети. Описать действующий лабораторный вариант организации такой инфраструктуры для работы роботов в группе.

1. Методика исследований

Экспериментальные исследования проводились как для одного, так и для группы роботов. Причем, управление роботами основывалось на подходах и методах, изложенных ранее авторами в [2-4], но с учетом функционирования робота в сети Интернет без посредников напрямую. Запись всех передаваемых данных делалась как со стороны робота, так и со стороны веб-сервиса сервера в лаборатории. Синхронизация и анализ совместных данных проводился по данным высокоточного таймера компьютера сервера, так как роботы не имели на борту часов реального времени. Дополнительно на прототипе робота был размещен двухстрочный индикатор для быстрой визуальной оценки, настройки и установки начальных параметров экспериментов (рис. 1). Для задач мониторинга в системах “Умный дом” отрабатывались типовые сценарии: перемещение, замер характеристик, передача данных на сервер, получение нового задания от сервера и так по циклу с передачей в режиме реального времени пакетов о состоянии работы системы управления роботом. При этом интернет-робот дополнительно взаимодействовал с сервисами Сети запрашивая интеллектуальную составляющую для систем «Умный дом» – чтение простых данных о погоде, давлении, температуре для лабораторного помещения (POST/GET запросы к веб-сервису вне лаборатории, порталу-агрегатору метеоданных http://openweathermap.org/).

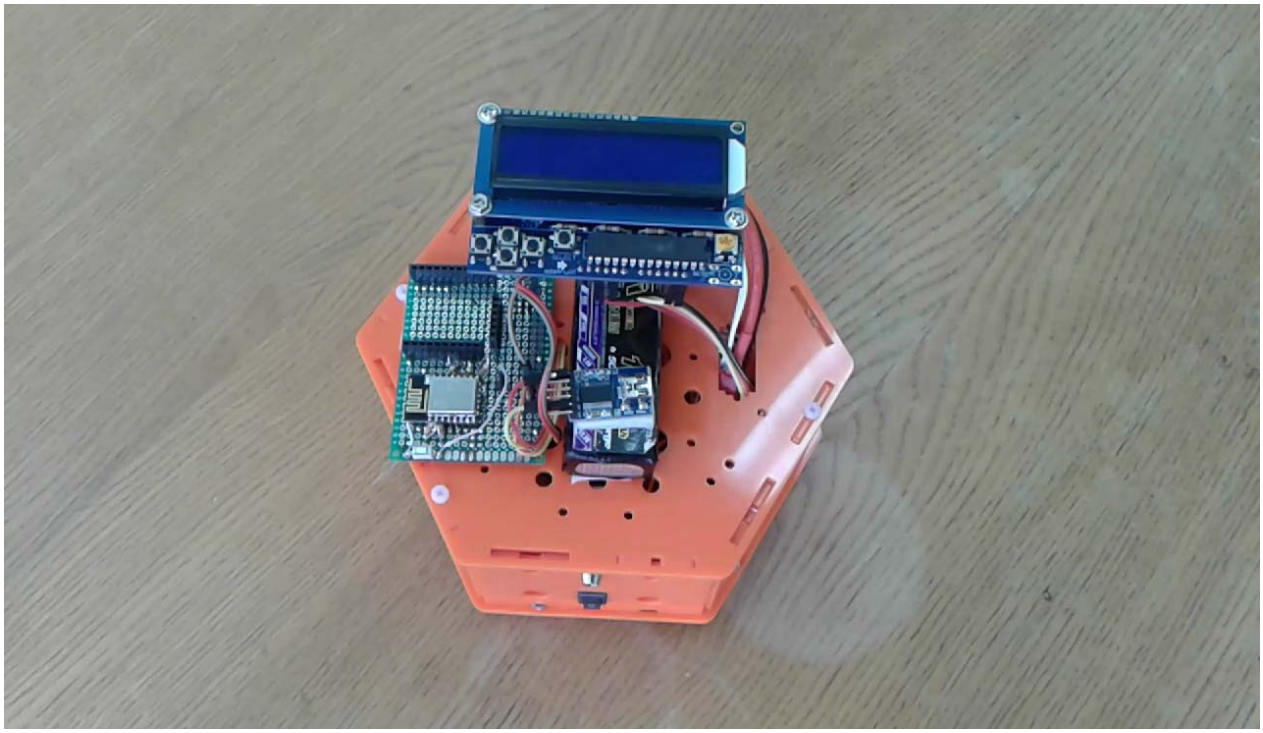


Рисунок 1 – Прототип малогабаритного мобильного интернет-робота

2. Описание прототипа системы управления интернет-роботом

За основу аппаратной платформы системы управления верхнего уровня взята SoCES8266, которая спроектированная как раз для малогабаритных встраиваемых систем. Она облегчает интеграцию интернет-робота в систему «Умный дом» построенную на Wi-Fi сетях (рис. 2).

Рисунок 2 – SoCES8266 со встроенной антенной установлена на монтажной плате

SoCES8266 включает в себя все необходимые аппаратные блоки для работы системы управления роботом (блок-схема модуля представлена на рис. 3).

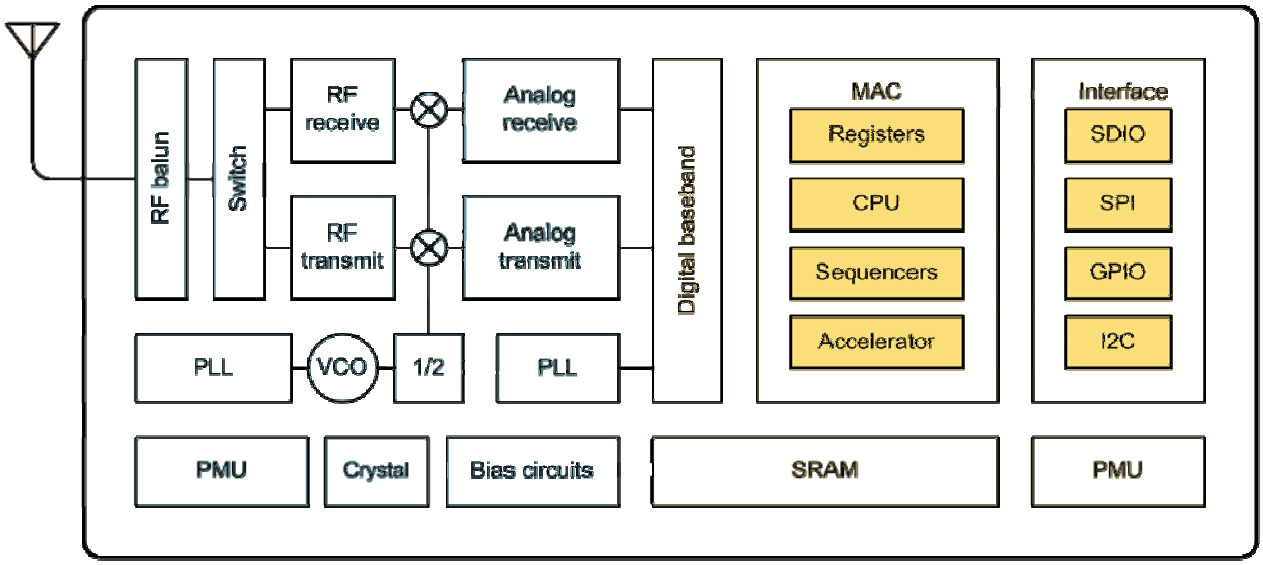


Рисунок 3 – Блок-схема SoCES8266

Следующий ряд технических характеристик чипа для нас является существенным:

— работа с WI-FI сетями стандарта 802.11 b/g/n с поддержкой шифрования WEP, WPA, WPA2.
— напряжение питания 3.0 ... 3.6 В.
— потребляемый ток: <10uA в режиме ожидания.
— внешняя подключаемая память flash память до 16 мб.
— сохранение работоспособности при температурах то -40 до +125 градусов Цельсия.

В качестве платы системы управления нижнего уровня движением и работой датчиков робота выбрана разработанная авторами плата [5]. С ней SoC производит обмен данными по COM-порту на скорости 57600 бод (рис. 4).

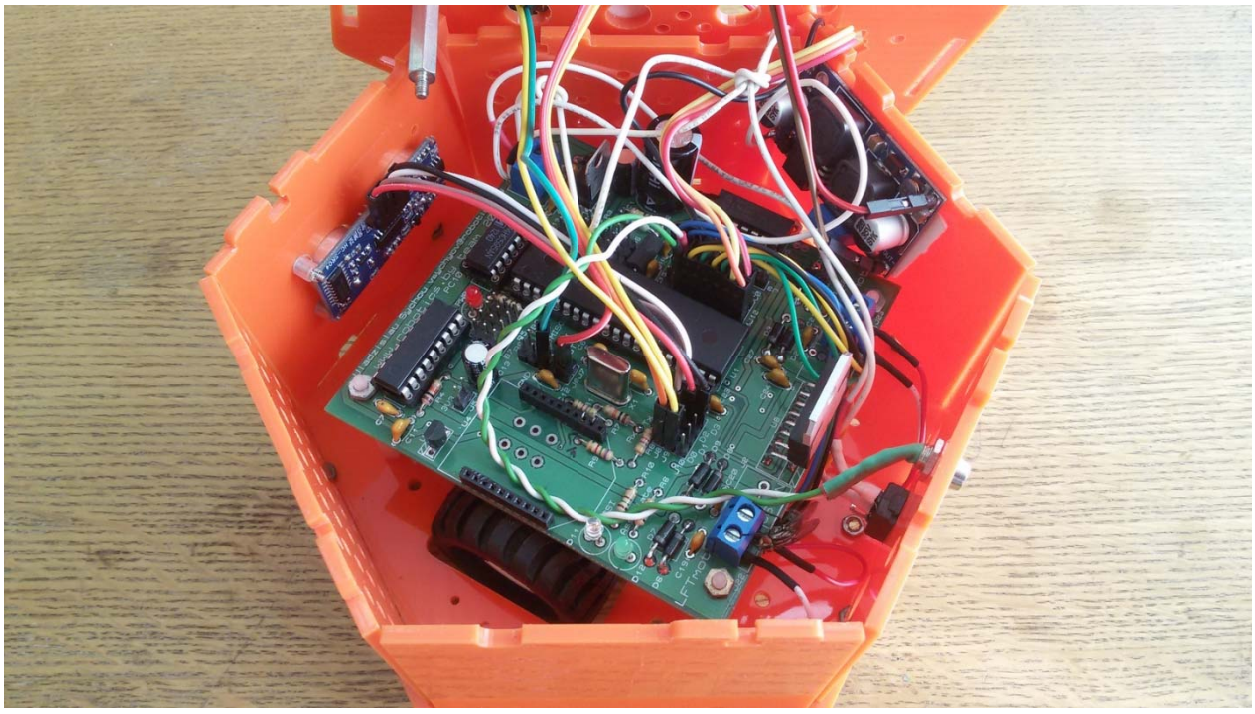


Рисунок 4 – Плата системы управления нижнего уровня

3. Конфигурация сетевой инфраструктуры

Сетевое окружение настроено так, чтобы предоставить интернет-роботу защищенный паролируемый доступ к сети Internet по протоколам WPA2 с использованием 256 битного AES шифрования. Точка доступа ZyxelKinectUltra, обеспечивающая качественную работу Wi-Fi, была подключена к высокоскоростному каналу сети BASNET Объединённого института проблем информатики НАН Беларуси, которая основывается на пятнадцати базовых сетевых узлах, связанных

высокоскоростными оптоволоконными каналами общей протяженностью более 80 км, обеспечивающими передачу данных по сети со скоростью до 10 Гбит/сек. Общий пинг до провайдеров по маршрутам Минск-областные города Республики Беларусь при этом составил менее 10мс, по маршрутам Минск-города Российской Федерации от 80 (Смоленск) до 740мс (Петропавловск-Камчатский).

Сервер управления роботом установлен в лаборатории и сконфигурирован на работу на отдельном выделенном статическом IPv4 адресе сети интернет. Транспортным протоколом управления интернет-роботом с сетью был выбран стандарт WebSocket, версия 13[6]. Для обеспечения работы с роботом по протоколу WebSocket был открыт TCP порт сервера 60000 из верхнего диапазона портов. Сам обмен управляющими командами был программно реализован на базе классов QtWebSockets библиотеки Qt 5.7.0. При передаче команд использовался текстовый формат сообщений.

Веб-клиент для слежения пользователем за своими роботами, html страница, была сверстана на html5 с использованием языка JavaScript с элементами UI, предлагаемыми библиотекой Bootstrap. Реализация протокола WebSocket в браузерах позволяет дополнительно обрабатывать ошибки при соединении.

Общий URL подключения робота и веб-клиента к серверу имеет вид ws://[IP]:[PORT]/

Менеджмент сообщений на стороне сервера основан на подписи пакетов ключем (Sec-WebSocket-Key) размером 16 байт в кодировке Base64.

4. Анализ результата работы прототипа системы управления интернет-робота

Прототип системы управления интернет-роботом в описанной выше конфигурации качественно отработал все задачи мониторинга для системы “Умный дом” (рис. 5).

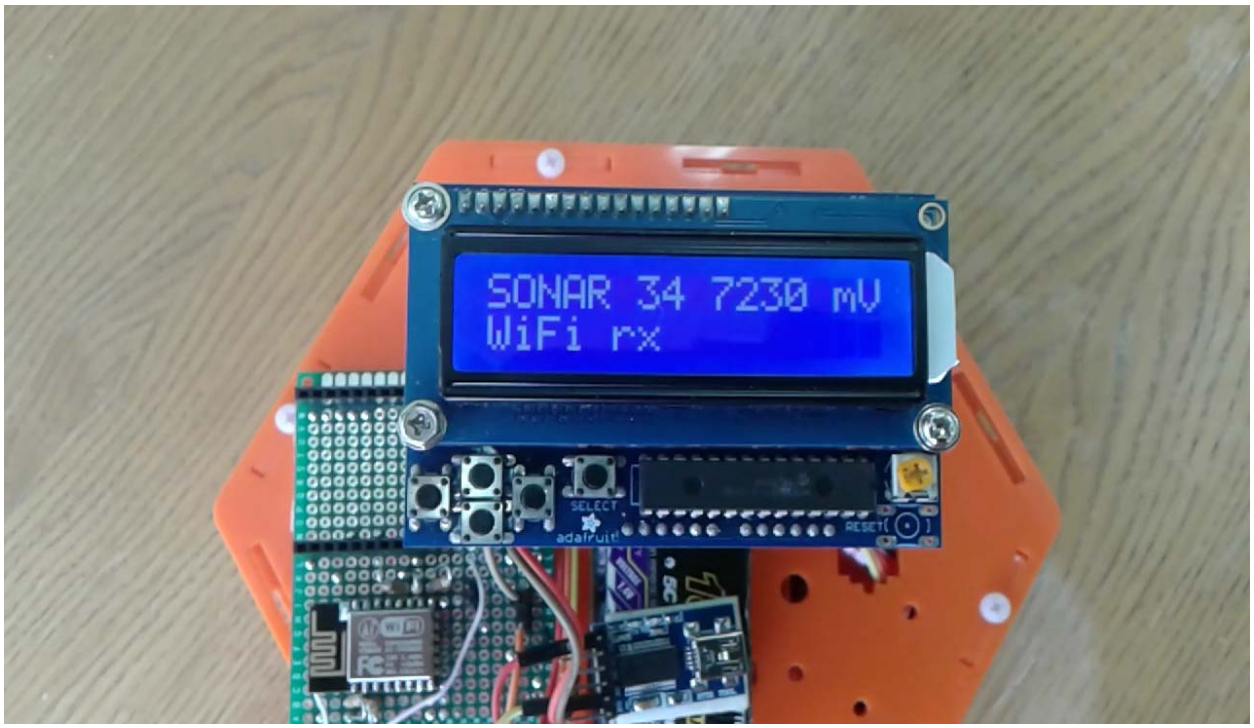


Рисунок 5 – Работа робота в режиме мониторинга

Однако есть ряд выявленных особенностей и ограничений, требующих проведения дальнейших исследований и опытов:

— сильная зависимость передачи команд роботу от величины пинга сети, которая приводит к тому, что, когда превышено время ожидания команды, нужно предусмотреть в управляющей программе переход робота к полностью автономной работе. В нашем случае это ведет к большому расходу памяти по накоплению всех данных замеров и отложенной передаче их серверу. Т. е. это задача подбора величины такта системы управления роботом и расчет максимально возможного времени автономной работы;

— большая трата вычислительных ресурсов SoC робота на взаимодействие с интернет сервисами Сети. Так как все существующие сервисы сети не ориентированы на пользователя-робота, то есть потребность использования специального протокола обмена объектами с максимальной

эффективностью, упаковывающей данные. Задача интеллектуальной передачи данных с использованием минимума ресурса сети;

— несмотря на то, что данный способ управления через сеть Интернет был испробован всего лишь на трёх одновременно функционирующих прототипах мобильных роботов, стоит актуальная задача определения теоретического и практического максимально возможного числа роботов в группе.

Заключение

Исследована работа прототипа системы управления малогабаритным мобильным роботом, предназначенного для функционирования в задачах мониторинга местности, а также в системах «Умный дом». Проведенные натурные эксперименты показали, что создание интернет-роботов является возможным, и актуализировали проблемы, стоящие на пути их создания и совершенствования. Рассмотренная в статье технология управления мобильными роботами посредством протоколов сети Интернет в дальнейшем позволит роботам пользоваться сетевыми облачными веб-сервисами суперкомпьютерных центров Сети самостоятельно и/или под руководством оператора.

Работа выполнена при поддержке БРФФИ–ГФФИУ, договор №Ф15УК/А048 «Разработка алгоритмов обработки, кодирования, анализа и передачи сенсорных данных для составления трёхмерных карт местности в задачах ориентирования мобильных роботов и беспилотных аппаратов» (2015-2017 гг.) и портала http://www.robotics.by [7].

1. Шагурин И. Системы на кристалле. Особенности реализации и перспективы применения // Электронные компоненты. — Издательский дом Электроника, 2009. — № 1.
2. Герасюто, С.Л. Исследование особенностей масштабирования численности группы малогабаритных мобильных роботов при централизованном и децентрализованном способах управления / С.Л. Герасюто, Г.А. Прокопович, В.А. Сычёв // Экстремальная робототехника / ЦНИИ РТК ; пад рэд. Юревич Е.И.. — Санкт-Петербург : ЦНИИ РТК, 2015. — С. 76-81.
3. 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.
4. 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.
5. Сычёв В.А. Программно-аппаратное обеспечение учебно-методического комплекса по робототехнике / В.А. Сычёв, Г.А. Прокопович, С.Л. Герасюто // Электроника Инфо. – 2014. - №6 (108). – С. 26-29.
6. I. Fette, A. Melnikov: The WebSocket Protocol RFC 6455. Internet Engineering Task Force (2011).
7. Робототехника в Республике Беларусь [Электронный ресурс] / Roboticsby. – Минск: 2016. – Режим доступа: http://www.robotics.by/. – Дата доступа: 10.08.2016.

Dang Suan Hiep[1], A.P. Karpenko[1], S.N. Sayapin[1,2]

IN-PIPE PARALLEL ROBOT OF DODEKAPOD TYPE

[1]Bauman Moscow State Technical University
[2]Federal Budget-Funded Research Institute for Machine Science named after A.A. Blagonravov of the Russian Academy of Sciences (IMASH RAN), Moscow
dxhiep@gmail.com, apkarpenko@mail.ru, s.sayapin@rambler.ru

Abstract

The paper presents a parallel robot of dodekapod type. The dodekapod consists of six hinge joints and twelve rods of variable length connecting these joints. We consider the condition for the dodekapod's passing through the pipe of the following types: straight pipe sections of constant and variable; curved pipe; intersecting at right angles to the tube. Also we are introducing algorithms for movement of the dodekapod in cylindrical pipes of those types.

Keywords: dodekapod; parallel structure mechanism; intratubal robot.

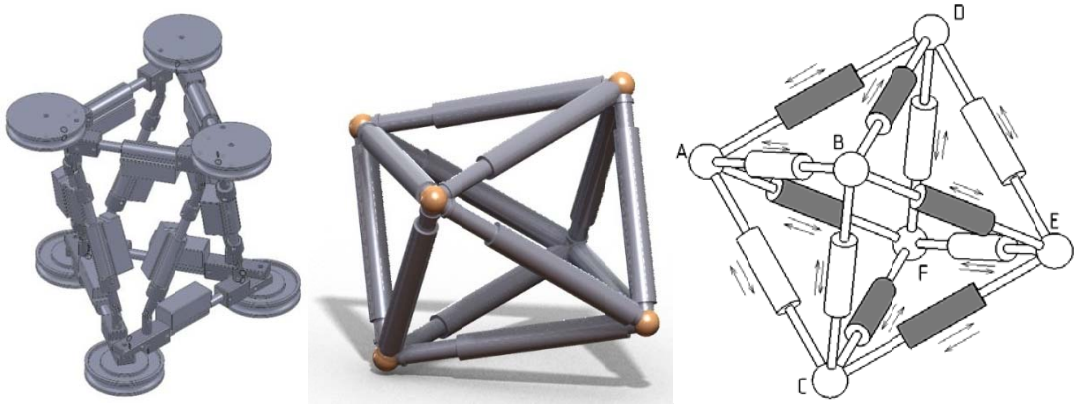
Introduction

In the past years, high actual of creating an in-pipe self-moving robot that can perform integrated diagnostic and repair work has aroused interest in studying the potential of utilizing robots that are based on spatial mechanisms of parallel structure and that can perform such kind of work [1]. Potentially, as compared with conventional robots of sequential structure, such robots have higher stiffness while having a lightweight mechanism, their working body moves more accurately, and they are able to move massive loads at a relatively high speed.

The article [2] presents a robot of parallel structure that can self-move not only inside but also outside pipes of constant and variable profiles (with small changes in the diameter of pipes in their junctions). Structurally, the robot is a Gough-Stewart platform with both a rigid annular base and platform. The base and the platform are equipped with four radial sliding stops for both in-pipe motion and motion outside the pipe.

In 2008, at the 22nd International Congress on Theoretical and Applied Mechanics (held in Adelaide, Australia, 24 - 29 August, 2008) S.N. Sayapin and A.V. Sinyov proposed (and patented in 2011) a new vehicle that can move inside pipes and that was named dodekapod (RF patent № 2424893) – Figure 1, b.

In 2012 Amr Bekhit, who works at the University of Leeds (England), developed an intratubal robot that can move inside a horizontal cylindrical pipe (Figure 1, a) [3].



a) b) c)

Figure 1 – Schematic diagrams of in-pipe robots of parallel structure and a utilized model of the dodekapod: a) Amr Bekhit robot; b) Sayapin-Sinyov dodekapod; c) dodekapod model

Dodekapod kinematics and dynamics are investigated in works [4, 5], dodekapod motion algorithms in certain pipe types are investigated in works [6 - 8], possibility of building different spatial structures on the basis of dodekapod is investigated in works [9, 10]. In this work we present a summary of all the algorithms developed by the authors for the dodekapod moving in cylindrical straight pipes with a constant and variable cross-section, in curved pipes, as well as in pipes intersecting at right angles.

The dodekapod structure was selected on the basis of the analysis of structural strength of platonic solids [10]. The dodekapod consists of six hinge joints A, B, C, D, E, F and twelve rods of variable length connecting these joints (Figure 1, c). Joints A, B, C and D, E, F are defined by two planes. When the dodekapod moves inside a cylindrical pipe of constant and variable cross-sections, these components act as stops. For example, when joints A, B, C are fixed, joints D, E, F can move along the pipe by simultaneously changing the lengths of the side *lateral* rods AD, AE, BD, BF, CE, CF. It is easy to show that the presented model of the dodekapod has 12 degrees of freedom.

2. Conditions of the dodekapod's passability inside cylindrical pipes of various types

We assume that while the dodekapod moves there is no slippage of its spherical joints which are based on the walls of the pipe in which it moves. We suppose that $l_{\min}, l_{\max}$ are the minimum and maximum rod lengths, respectively; δ is the diameter of the dodekapod's joints.

Straight pipe of constant cross-section. The condition for the dodekapod's passing through the pipe of this kind is as follows:

$$\frac{2}{\sqrt{3}} l_{\min} + \delta \le d \le \frac{2}{\sqrt{3}} l_{\max} + \delta . \tag{1}$$

Straight pipe of variable cross-section. We assume the following notations: d_1, d_2 are diameters of the first and second pipes, respectively; Δ is the transition length (Figure 2).

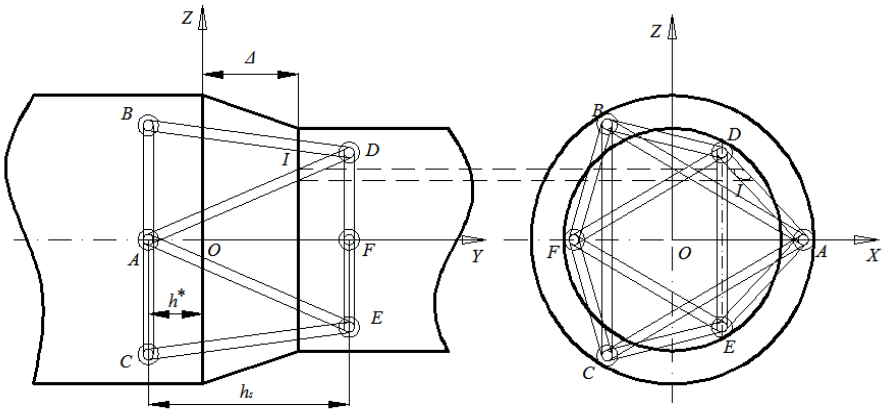


Figure 2 – Movement of the dodekapod in a cylindrical pipe of variable cross-section

In order to avoid collisions of the dodekapod's rods with the walls of the pipe during the dodekapod's moving, inequations similar to the inequation (1) must be made. Restriction on the maximum permissible step length of the dodekapod h_{smax} is

$$h_{s\max} = \pm \frac{\sqrt{3}\,(d_2 - \delta)}{4\, z_I} \left(h^* - \Delta \right), \tag{2}$$

where the "plus" sign refers to the case where the ABC plane of the dodekapod is in the pipe d_1 (as shown in Figure 2), and the "minus" sign refers to the case when the specified plane is in transition and at the distance h^* from its beginning;

$$z_I = \frac{\sqrt{c} - a\,b}{a^2 + 1};\ a = \frac{d_2 - 2d_1 + \delta}{\sqrt{3}(d_2 - \delta)},\ b = \frac{d_1 - \delta}{2},\ c = a^2 b^2 - \left(a^2 + 1\right)\left(b^2 - \frac{(d_2 - \delta)^2}{4} \right).$$

Curved tube of constant cross-section (Figure 3). In order for the dodekapod to pass the rounding of the pipe it is necessary to satisfy the inequation (1), as well as the following conditions:

$$\theta \in \begin{cases} [\theta_{\min}; \theta_{\max}], & \theta_{\max} < \theta_{\Pi}, \\ [\theta_{\min}; \theta_{\Pi}], & \theta_{\Pi} < \theta_{\max}. \end{cases} \tag{3}$$

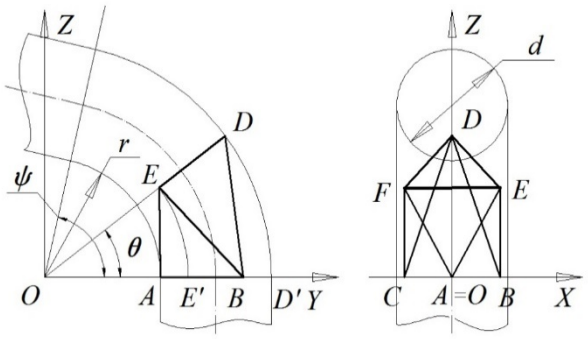


Figure 3 – Dodekapod's moving inside a curved pipe

In the expression (3), variables $\theta_{\min}$, $\theta_{\max}$, θ_{Π} are trigonometric functions of values $d, r, \delta, l_{\min}, l_{\max}$ [6].

Self-intersecting pipes of constant cross-section. We consider cylindrical pipes of diameters d_1, d_2 that intersect at the right angle. The following conditions must be met for the dodekapod to move from the first pipe into the second one:

$$l_{\max} > \sqrt{d_1^2 + \left(\frac{d_2 - \delta}{2}\right)^2}\ ; \quad \frac{2}{\sqrt{3}} l_{\min} + \delta \le d_1, \quad d_2 \le \frac{2}{\sqrt{3}} l_{\max} + \delta\ . \tag{4}$$

3. Algorithms for movement of the dodekapod in cylindrical pipes of various types

Straight pipe of constant cross-section. The diagram of *algorithm 1* that shows the dodekapod making one step is as follows.

1) Reduce the length of rods AB, BC, CA of the left face up to the value $l_{\min}$.

2) Reduce the length of all side rods up to the same value.

3) Increase the length of the rods of the left plane up to the maximum possible length $l_s = \sqrt{3}/2\ (d - \delta)$.

4) Reduce the length of rods DE, EF, DF of the right plane up to $l_{\min}$.

5) Increase the length of all the side rods up to $l_{\max}$.

6) Increase the length of the rods of the right plane up to l_s.

Moveming of the dodekapod in a straight pipe of constant cross-section is shown in Figure 4. Hereinafter the *SolidWorks* model of the dodekapod is used.

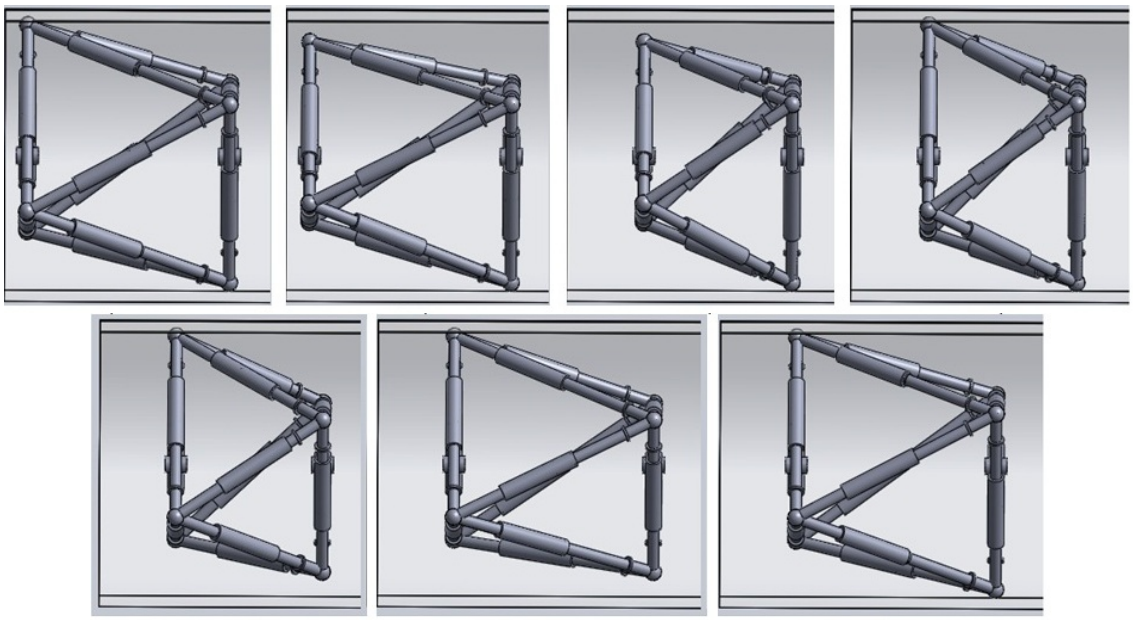


Figure 4 – Moveming of the dodekapod inside a cylindrical pipe of constant cross-section

Straight pipe of variable cross-section. A simplified diagram of *algorithm 2* for moveming of the dodekapod in a pipe of this type is shown in Figure 5.

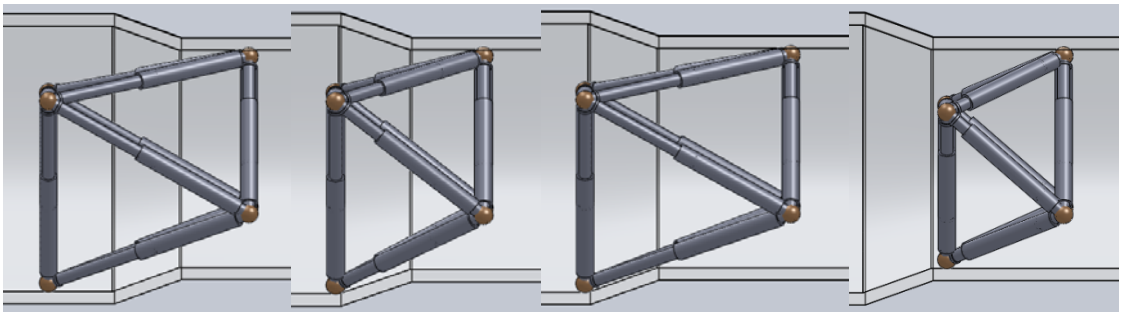


Figure 5 – The dodekapod overcomes the constriction of the cylindrical pipe

1) The dodekapod moves through pipe d_1, using algorithm 1.
2) If the condition (2) is satisfied, the dodekapod moves with an appropriate step.
3) The dodekapod continues to move through pipe d_2, using algorithm 1.

Curved pipe of constant cross-section. Moveming of the dodekapod in the curved pipe is shown in Figure 6. The corresponding diagram of *algorithm 3*is as follows.

1) The dodekapod moves through the straight part of the pipe with a maximum possible step h_s up to the pipe rounding.
2) The dodekapod moves through the curved part of the pipe with a maximum possible angular step $\theta_s = \theta_{\max} - \theta_{\min}$.
3) After it passes the rounding, the dodekapod moves through the straight part of the pipe with step h_s .

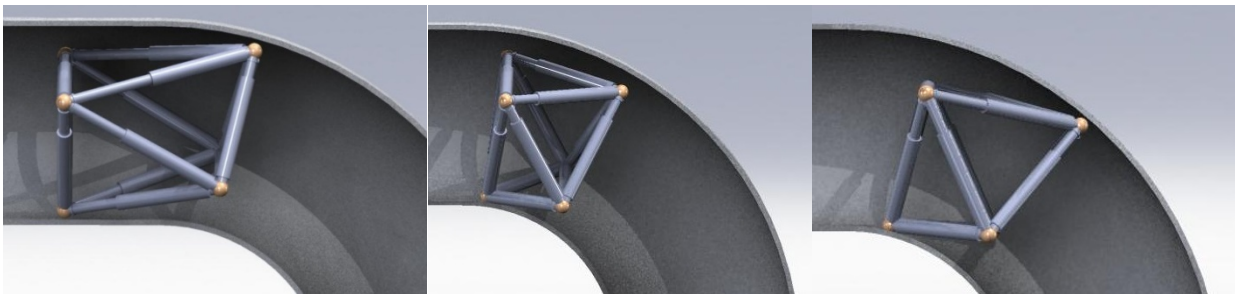


Figure 6 – Stages moveming of the dodekapod in a curved pipe

Self-intersecting pipes of constant cross-section. For this case, the diagram of *algorithm 4* for the dodekapod moveming is shown in Figure 7.

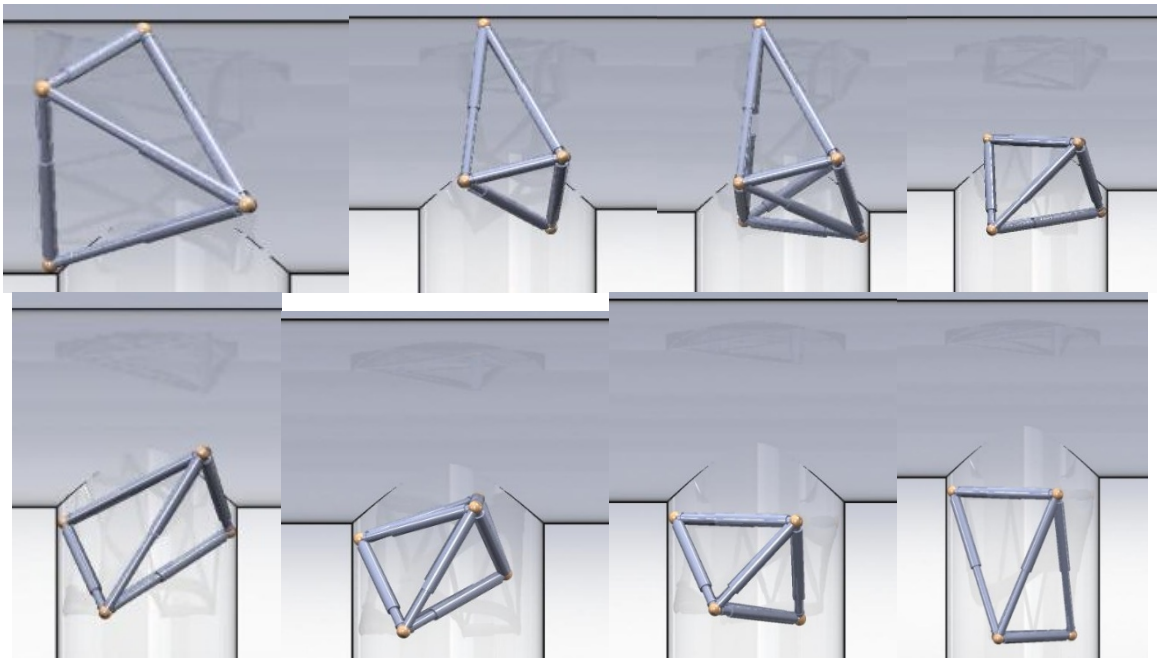


Figure 7 – Moveming of the dodekapod inside intersecting pipes

1) The dodekapod moves through the straight part of pipe d_1 with step h_s as far as the transition into pipe d_2

2) Plane DEF is fixed at the transition parallel to the transition cross-section.

3) Plane ABC enters the second pipe and is fixed there.

4) Plane DEF enters the second tube and is fixed there.

5) The dodekapod moves through the straight part of the second pipe with a atep h_s.

Conclusion

We obtained conditions of moveming of the dodekapod through cylindrical pipes of the following types: straight pipes of constant and variable cross-sections; curved pipes; pipes intersecting at right angles. The authors developed and presented algorithms for movement of the dodekapod in pipes of these types. A three-dimensional dynamic model of the dodekapod Solidworks, allowing to visualize moveming through pipes, was developed. The authors plan to develop the *design* of the dodekapod and synthesis of its control system.

1. V.A. Glazunov. Spatial spatial parallel structure mechanisms / V.A. Glazunov, A. Sh. Koliskor, A.F. Krainyov – Nauka, 1991. – p. 95
2. P. Bande. Kinematics analyses of Dodekapod / Prakash Bande, Martin Seibt, Eckart Uhlmann // Mechanism and Machine Theory. – 2005, Vol. 40. – Pp. 3740–756.
3. Amr Bekhit. Kinematic Analysis and Locomotion Strategy of a Pipe Inspection Concept for Operation in Active Pipelines / Abbas Dehghani, Robert Richardson // International Journal of Mechanical Engineering and Mechatronics. – 2012, Vol. 1, Issue 1. - PP. 1929 – 2724.
4. S.H. Dang. Kinematics of a Single-section Parallel “Dodekapod” Manipulator // Science and Education: Scientific Edition. – 2013, №2. URL: http://technomag.edu.ru/doc/539000.html.
5. S.H. Dang. Workspace of Parallel Mechanism of Dodekapod Type // Science and Education: Scientific Edition. – 2014, №10. URL: http://technomag.bmstu.ru/doc/712404.html.
6. A.P. Karpenko. Dodekapod's movement algorithm within a linear cylindrical tube of variable cross-section / A.P. Karpenko, S.H. Dang. S.N. Sayapin // Science and Education: Scientific Edition. – 2013, №8. URL: http://technomag.bmstu.ru/doc/587740.html
7. S.H. Dang. Algorithm for movement of the dodekapod inside a curved cylindrical tube of constant cross-section // Bulletin of Moscow State Automobile & Road Technical University (MADI). – 2015, issue 1(40). – p. 37-46.
8. S.N. Sayapin. Use of a mobile robot with parallel kinematics of the "dodekapod" type with in-pipe diagnostics of branching conduits of variable cross-section. / S.N. Sayapin, S.H. Dang. A.P. Karpenko. V.V. Kokushkin // Engineering and Automation Problems. – 2016, №1. – p. 32-44.
9. S. Sayapin. Dodekapod as universal intelligent structure for adaptive parallel spatial self-moving modular robots / Sayapin S., Karpenko A., Dang Xuan H. // Nature-inspired mobile robotics. Proceedings of the 16th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines. – 2013. – PP. 163-167.
10. S.N. Sayapin. Universal Adaptive Spatial Parallel Robots of Module Type Based on the Platonic Solids / Sayapin S.N., Karpenko A.P., Dang S.H. // World Congress on Engineering: International Association of Engineers. Vol. II. – 2014. – PP. 1365-1370.

Данг Суан Хиеп[1], А.П. Карпенко[1], С.Н. Саяпин[1,2]

ВНУТРИТРУБНЫЙ РОБОТ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ТИПА ДОДЕКАПОД

[1]МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва
[2]ИМАШ РАН им. А.А. Благонравова, Москва
dxhiep@gmail.com, apkarpenko@mail.ru, s.sayapin@rambler.ru

Аннотация

В работе представлен робот параллельной структуры типа додекапод, основу которого составляет 12 штанг переменной. Рассматриваем условия проходимости додекаподом цилиндрических труб следующих типов: прямолинейные трубы постоянного и переменного сечений; криволинейные трубы; пересекающиеся под прямым углом трубы. Представляем алгоритмы движения додекапода в трубах указанных типов, а также трехмерную динамическую Solidworks модель додекапода, позволяющую визуализировать его движение в этих трубах.

Ключевые слова: додекапод; механизм параллельной структуры; внутритрубный робот.

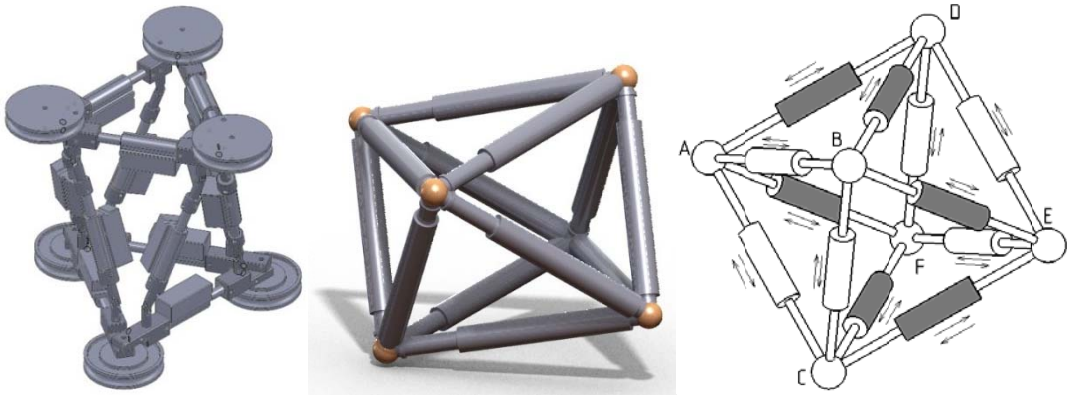
Введение

Высокая актуальность создания универсального внутритрубного самоперемещаемого робота, способного решать комплексные задачи по проведению диагностических и ремонтно-восстановительных работ, вызвала в последние годы интерес к исследованию возможностей использования для этих целей роботов, построенных на основе пространственных механизмов параллельной структуры [1]. Потенциально, такие роботы обладают, в сравнении с классическими роботами последовательной структуры, более высокой жесткостью при малой массе механизма, более высокой точностью перемещения рабочего органа, а также способностью перемещать с относительно высокими скоростями массивные грузы.

В работе [2] представлен робот параллельной структуры, способный самоперемещаться не только внутри, но и снаружи труб постоянного и переменного профилей (при небольших изменениях диаметра труб в месте их соединений). Конструктивно, робот представляет собой платформу Гауфа-Стюарта с жесткими кольцевыми основанием и платформой. Основание и платформа снабжены четырьмя радиальными выдвижными упорами-схватами для внутритрубного перемещения и для перемещения снаружи трубы.

В 2008 г. на XXII-ом международном конгрессе «Theoretical and Applied Mechanics» (Adelaide, Australia, 24–29 August 2008) С.Н. Саяпиным и А.В. Синевым предложено, а 2011 г. запатентовано новое транспортное средство для перемещения по внутренним поверхностям труб, получившие наименование додекапод (патент РФ на изобретение № 2424893) - рисунок 1,б.

В 2012 году Амр Бехит из университета Лидса (Leeds University, England) разработал внутритрубный робот, который может перемещаться в горизонтальной цилиндрической трубе (рисунок 1,а) [3].



а) б) в)

Рисунок 1 – Схемы внутритрубных роботов параллельной структуры и используемая модель додекапода: а) робот Амара Бехита; б) додекапод Саяпина-Синева в) модель додекапода

Кинематика и динамика додекапода исследованы в работах [4, 5], алгоритмы перемещения додекапода в некоторых типах труб – в работах [6 - 8], возможности построения на основе додекаподов различных пространственных структур – в работах [9, 10]. В данной работе представляем сводку всех алгоритмов, разработанных авторами для перемещения додекапода в цилиндрических прямолинейных трубах постоянного и переменного сечений, криволинейных трубах, а также в трубах, пересекающиеся под прямым углом.

Конструкция додекапода выбрана на основе анализа прочности конструкции платоновых тел [10]. Додекапод состоит из шести шарнирных узлов A, B, C, D, E, F и двенадцати штанг переменной длины, соединяющих эти узлы (рисунок 1,в). Узлы A, B, C и D, E, F определяют две плоскости. При движении додекапода в цилиндрической трубе постоянного и переменного сечений, эти тройки узлов играют роль упоров. Когда, например, узлы A, B, C фиксированы, узлы D, E, F могут перемещаться вдоль трубы за счет одновременного изменения длин *боковых штанг* AD, AE, BD, BF, CE, CF. Легко показать, что представленная модель додекапода обладает 12 степенями свободы.

2. Условия проходимости додекаподом цилиндрических труб разного типа

Принимаем, что в процессе движения додекапода отсутствует проскальзывание его сферических шарниров, опирающихся на стенки трубы, в которой он перемещается. Положим, что $l_{\min}, l_{\max}$ - минимальная и максимальная длины штанг додекапода соответственно; δ- диаметр его шарниров.

Прямолинейная труба постоянного сечения. Условие прохождение додекаподом трубы данного типа имеет вид

$$\frac{2}{\sqrt{3}} l_{\min} + \delta \le d \le \frac{2}{\sqrt{3}} l_{\max} + \delta \,. \tag{1}$$

Прямолинейная труба переменного сечения. Принимаем следующие обозначения: d_1, d_2 - диаметры первой и второй труб соответственно; Δ - длина перехода (рисунок 2).

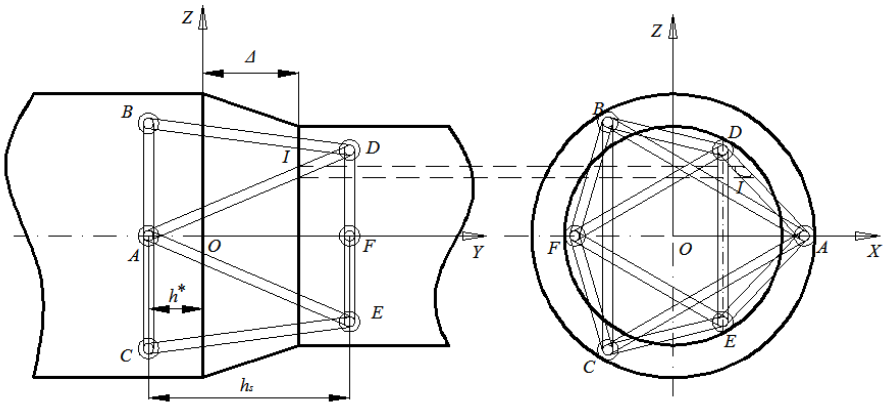


Рисунок 2 – Схема прохождения додекаподом цилиндрической трубы переменного сечения

Для того чтобы избежать во время перехода столкновения штанг додекапода со стенками трубы, должны быть выполнены неравенства, аналогичные неравенству (1). Ограничение на максимально допустимую длину шага додекапода h_{smax}при этом имеет вид

$$h_{s\max} = \pm \frac{\sqrt{3}\,(d_2 - \delta)}{4\, z_I} \left(h^* - \Delta\right), \tag{2}$$

где знак «плюс» относится к случаю, когда грань ABC додекапода находится в трубе d_1 (как показано на рисунке 2), а знак «минус» - к случаю, когда указанная грань находится в переходе и на расстоянии h^* от его начала;

$$z_I = \frac{\sqrt{c} - a\,b}{a^2 + 1}\,;\; a = \frac{d_2 - 2d_1 + \delta}{\sqrt{3}(d_2 - \delta)}\,,\; b = \frac{d_1 - \delta}{2}\,,\; c = a^2 b^2 - \left(a^2 + 1\right)\left(b^2 - \frac{(d_2 - \delta)^2}{4}\right).$$

Криволинейная труба постоянного сечения (рисунок 3). Для преодоления додекаподом скругления трубы необходимо выполнение неравенства (1), а также условия

$$\theta \in \begin{cases} [\theta_{\min}; \theta_{\max}], & \theta_{\max} < \theta_{П}, \\ [\theta_{\min}; \theta_{П}], & \theta_{П} < \theta_{\max}. \end{cases} \tag{3}$$

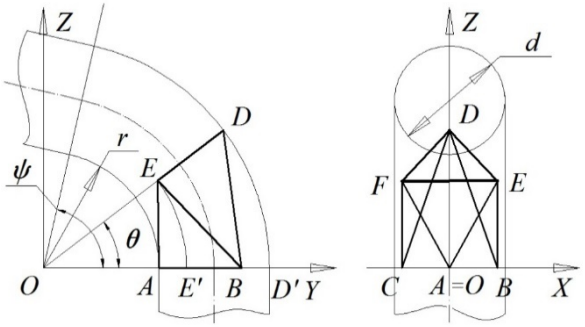


Рисунок 3 – Схема прохождения додекаподом криволинейнойтрубы

В выражении (3) переменные $\theta_{\min}, \theta_{\max}, \theta_{П}$ представляют собой тригонометрические функции величин $d, r, \delta, l_{\min}, l_{\max}$ [6].

Самопересекающиеся трубы постоянного сечения. Рассматриваем цилиндрические трубы диаметров d_1, d_2, пресекающиеся под прямым углом. Для того чтобы додекапод мог перейти из первой трубы во вторую, должны быть выполнены условия:

$$l_{\max} > \sqrt{d_1^2 + \left(\frac{d_2 - \delta}{2}\right)^2}\ ; \quad \frac{2}{\sqrt{3}} l_{\min} + \delta \le d_1\,, \quad d_2 \le \frac{2}{\sqrt{3}} l_{\max} + \delta\,. \tag{4}$$

3. Алгоритмы движения додекапода в цилиндрических трубах разного типа

Прямолинейная труба постоянного сечения. Схема *алгоритма* 1 перемещения додекапода на один шаг, имеет следующий вид.

1) Уменьшаем длины штанг *левой грани*AB, BC, CAдо величины $l_{\min}$.

2) Уменьшаем длины всех боковых штанг до той же величины.

3) Увеличиваем длины штанг левой грани до максимально возможной длины $l_s = \sqrt{3}/2\ (d - \delta)$.

4) Уменьшаем длины штанг *правой грани*DE, EF, DFдо $l_{\min}$.

5) Увеличиваем длины всех боковых штанг до $l_{\max}$.

6) Увеличиваем длины штанг правой грани до l_s.

Движение додекапода в прямолинейной трубе постоянного сечения иллюстрирует рисунок 4. Здесь и далее используется *SolidWorks*модель додекапода.

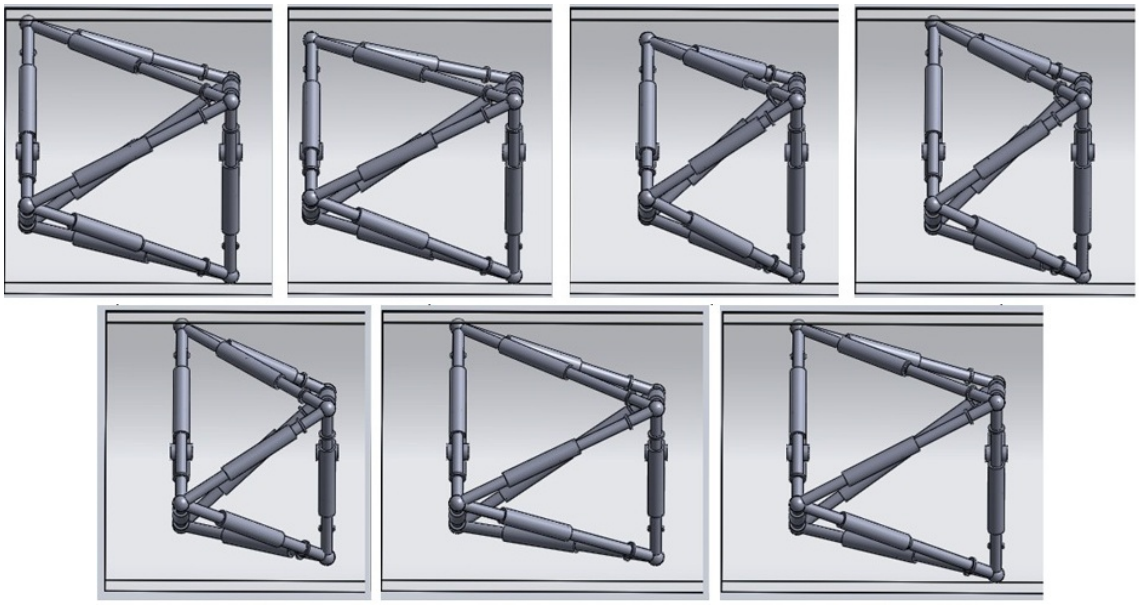


Рисунок 4 - Этапы движения додекапода в цилиндрической трубе постоянного сечения

Прямолинейная труба переменного сечения. Упрощенная схема *алгоритма* 2 движения додекапода в трубе данного типа имеет следующий вид (рисунок 5).

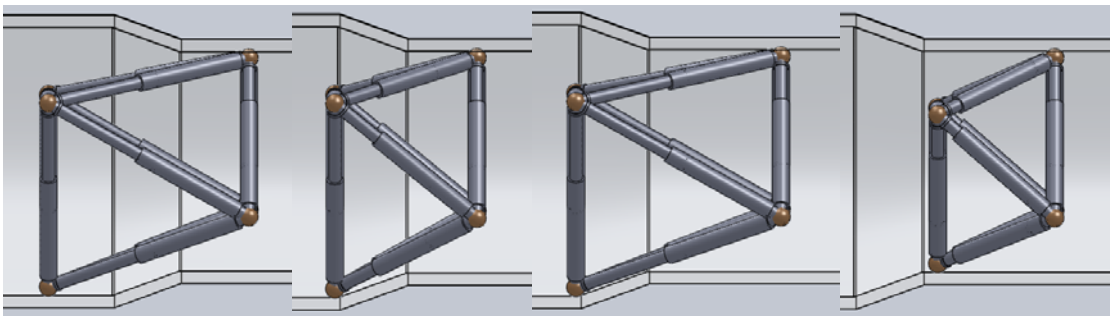


Рисунок 5 - Этапы преодоления додекаподом сужения цилиндрической трубы

1) Додекапод перемещается по трубе d_1 с использованием алгоритма 1.

2) Если условие (2) выполнено, то додекапод преодолевает переход с соответствующим шагом.

3) Додекапод продолжает двигаться по трубе d_2, использую алгоритм 1.

Криволинейная труба постоянного сечения. Движение додекапода в криволинейной трубе иллюстрирует рисунок 6. Соответствующая схема *алгоритма* 3 имеет следующий вид.

1) Додекаподдвижется в прямолинейной части трубы с максимальным возможным шагом h_s до скругления трубы.
2) Додекаподдвижется в криволинейной части трубы с максимальным возможным угловым шагом $\theta_s = \theta_{\max} - \theta_{\min}$.
3) После преодоления скругления, додекапод движется в прямолинейной части трубы с шагом h_s .

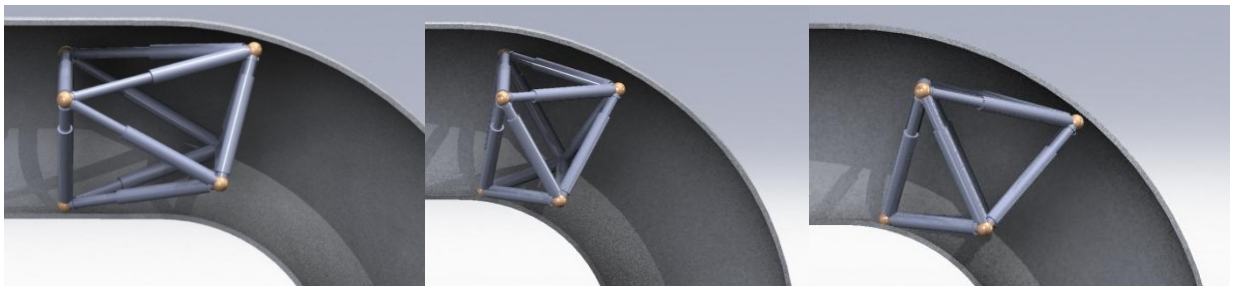


Рисунок 6 - Этапы движения додекапода в криволинейной трубе

Самопересекающиеся трубы постоянного сечения. Схема *алгоритма* 4 движения додекапода имеет в данном случае следующий вид (рисунок 7).

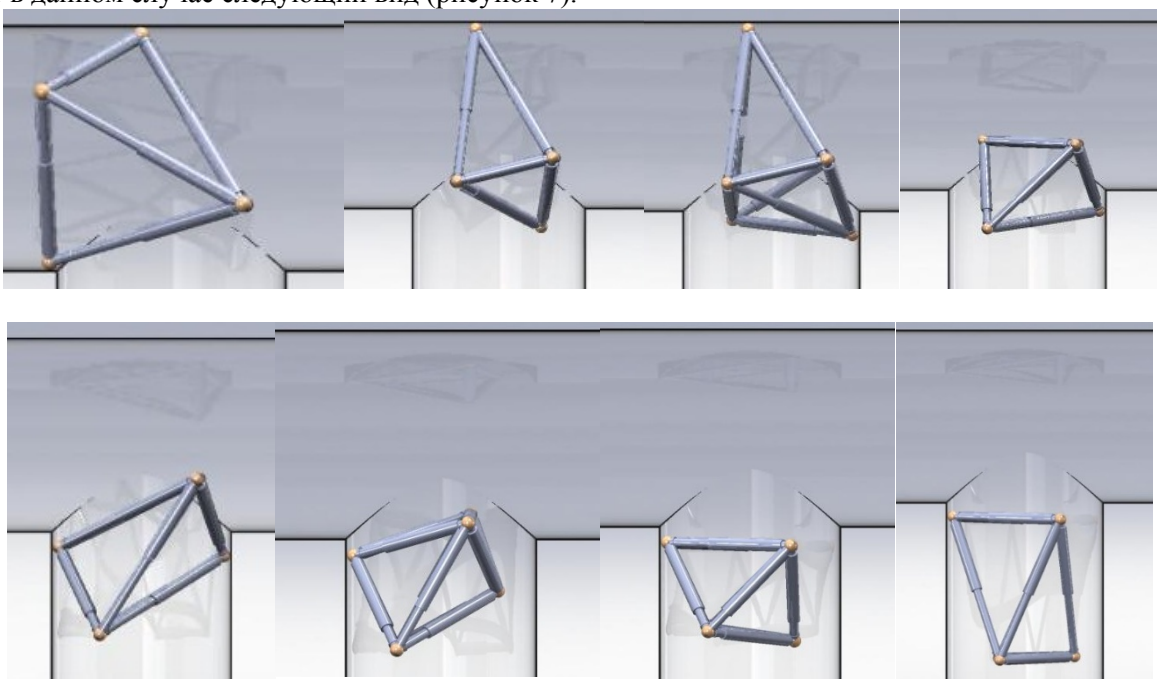


Рисунок 7 - Движение додекапод в пересекающихся трубах

1) Додекаподдвижется в прямолинейной части трубы d_1 с шагом h_s до перехода в трубу d_2 .
2) Грань DEFфиксируется на переходе параллельно сечению перехода.
3) Грань ABCпереходит внутрь второй трубы и фиксируется.
4) Грань DEFпереходит внутрь второй трубы и фиксируется.
5) Додекаподдвижется в прямолинейной части второй трубы с шагом h_s .

Заключение

В работе получены условия прохождения додекаподом цилиндрических труб следующих типов: прямолинейные трубы постоянного и переменного сечений; криволинейные трубы; пересекающиеся под прямым углом трубы. Представлены разработанные авторами алгоритмы движения додекапода в трубах указанных типов. Разработана трехмерная динамическая Solidworks модель додекапода, позволяющая визуализировать его движение в трубах. В развитие работы авторы планируют разработку конструкции додекапода и синтез системы его управления.

1. В.А. Глазунов. Пространственные механизмы параллельной структуры / Глазунов В.А., Колискор А.Ш., Крайнев А.Ф. – М.: Наука, 1991. – 95 с.
2. P. Bande. Kinematics analyses of Dodekapod / Prakash Bande, Martin Seibt, Eckart Uhlmann // Mechanism and Machine Theory. – 2005, Vol. 40. – Pp. 3740–756.

3. Amr Bekhit. Kinematic Analysis and Locomotion Strategy of a Pipe Inspection Concept for Operation in Active Pipelines / Abbas Dehghani, Robert Richardson // International Journal of Mechanical Engineering and Mechatronics. – 2012, Vol. 1, Issue 1. - PP. 1929 – 2724.
4. С.Х. Данг. Кинематика односекционного параллельного манипулятора типа «додекапод» // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. – 2013, №2. URL: http://technomag.edu.ru/doc/539000.html.
5. С.Х. Данг. Рабочее пространство параллельного механизма типа додекапода // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. – 2014, №10. URL: http://technomag.bmstu.ru/doc/712404.html.
6. А.П. Карпенко. Алгоритм движения додекапода в прямолинейной цилиндрической трубе переменного сечения / А.П. Карпенко, С.Х. Данг, С.Н, Саяпин // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. – 2013, №8. URL: http://technomag.bmstu.ru/doc/587740.html.
7. С.Х. Данг. Алгоритм движения додекапода в криволинейной цилиндрической трубе постоянного сечения // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2015, Выпуск 1(40). – С. 37-46.
8. С.Н. Саяпин. Применение мобильного робота с параллельной кинематикой типа «додекапод» при внутритрубной диагностике разветвленных трубопроводов переменного сечения / С.Н. Саяпин, С.Х. Данг, А.П. Карпенко, В.В. Кокушкин // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2016, №1. – С. 32-44.
9. S. Sayapin. Dodekapod as universal intelligent structure for adaptive parallel spatial self-moving modular robots / Sayapin S., Karpenko A., Dang Xuan H. // Nature-inspired mobile robotics. Proceedings of the 16th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines. – 2013. – PP. 163-167.
10. S.N. Sayapin. Universal Adaptive Spatial Parallel Robots of Module Type Based on the Platonic Solids / Sayapin S.N., Karpenko A.P., Dang S.H. // World Congress on Engineering: International Association of Engineers. Vol. II. – 2014. – PP. 1365-1370.

M.B. Ignatyev, P.I. Makin, J.A. Lipinskij

ROBOTS FOR GAS PIPELINES DIAGNOSTICS

Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation
robot@bmstu.ru

Abstract

In a lecture possibilities of autonomous adaptive stepping robot are examined for inside-tube diagnostics of gas pipelines, which ladles energy from the stream of gas and at stepping adapts to the burries of pipe and its bends. On a robot the systems of visual and ultrasonic diagnostics are set, information from which is processed in the proper expert systems.

Keywords: inside-tube diagnostics, gas pipelines, autonomous robot, adaptation, expert systems.

М.Б. Игнатьев, П.И. Макин, Я.А. Липинский

РОБОТЫ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ГАЗОПРОВОДОВ

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения
ignatmb@mail.ru

Аннотация

В докладе рассматриваются возможности автономного адаптивно шагающего робота для внутритрубной диагностики газопроводов, который черпает энергию из потока газа и при шагании приспосабливается к неровностям трубы и ее изгибам. На роботе установлены системы визуальной и ультразвуковой диагностики, информация с которых обрабатывается в соответствующих экспертных системах.

Ключевые слова: внутритрубная диагностика, газопроводы, автономный робот, адаптация, экспертные системы.

Самые различные трубы являются основой современной цивилизации – это водопроводы и канализация, нефтепроводы и газопроводы, химические производства и энергетика. Трубы изнашиваются,

подвергаются коррозии и деформациям, поэтому нуждаются в контроле и диагностике для предотвращения аварий. Существует большой арсенал средств для решения этой проблемы, однако они нуждаются в улучшении.

Предлагаемый нами (М.Б.Игнатьев и др., Патент на изобретение №2571242) автономный адаптивный шагающий робот (далее – робот) создан в целях диагностики газопроводов без отключения подачи газа. Робот перемещается на многие километры внутри трубы в потоке газа, откуда и черпает энергию; он не связан проводами с оператором – результаты диагностики сообщаются оператору по беспроводной системе связи. В разработке робота принимали участие студенты ГУАП Г.М. Герасимов, Я.А. Липинский, П.И. Макин, В.А. Ненашев. При создании робота были решены следующие проблемы.

Во-первых, проблема энергообеспечения. Все известные нам устройства для контроля и диагностики получают энергию по проводам, что существенно ограничивает их возможности. Мы предложили использовать поток газа для получения необходимой электроэнергии с помощью оригинальной ветротурбины, а в качестве исполнительных устройств применять оригинальные электромагниты на основе сильных постоянных магнитов, что и позволило обеспечить необходимый энергетический баланс. Большинство всякого рода трубопроводов заполнено различными жидкостями. На период ремонта трубопроводы освобождаются от жидкостей, и в них в качестве энергоносителя может подаваться сжатый воздух, из потока которого робот может черпать энергию.

Во-вторых, проблема адаптации робота к различным выступам, изгибам и деформациям при его перемещении внутри трубы. Эта задача решена нами путем использования принципа адаптивного шагания. У робота девять ног, башмачки которых поочередно втягиваются или вытягиваются до момента соприкосновения со стенками трубы. Активизированные электромагниты ног играют роль магнитных пружин, что и обеспечивает адаптацию к различным выступам, деформациям и изгибам.

В-третьих, проблема диагностики состояния трубы. Существует возможность закреплять на теле робота различные диагностические устройства, web-камеры с полупроводниковыми светодиодами для освещения внутренней поверхности трубы (до шести таких web-камер для полного осмотра). Вместо web-камер можно установить ультразвуковые генераторы и приемники для диагностики тела трубы. В-четвертых, проблема передачи информации человеку-оператору. Она решена с использованием беспроводной передачи, ведь труба – это хороший волновод.

Таким образом, был создан робот как оригинальный программно-аппаратный комплекс, позволяющий перемещаться внутри трубы газопровода и взаимодействовать с объектами. Он обеспечивает информационное погружение человека-оператора во внутреннюю среду газопровода в целях его диагностики.

Проведен анализ целей и задач использования робота в индивидуальном и групповом режимах, на основе которого должны быть разработаны сценарии использования робота для диагностики газопроводов различных типов.

Определен состав стандартных и специализированных программных и аппаратных модулей типового класса роботов с возможностью индивидуального и группового режимов работы. Автономный адаптивный шагающий робот существенно пополняет арсенал средств для диагностики газопроводов и повышает их безопасность. Появление киберфизических систем как отдельного класса знаменует новый уровень взаимодействия между физическими структурами и системам и управления.

Изготовлен экспериментальный образец автономного шагающего адаптивного робота для внутритрубной диагностики газопроводов (рис. 1, 3), который демонстрировался на Всемирной выставке в Ганновере 8–12 апреля 2013 года. Выступая на открытии выставки, канцлер Германии А. Меркель заявила, что развитие автоматизации позволяет провозгласить «Промышленность 4.0». Впервые этот термин прозвучал на выставке в 2011 г. Ключевая часть концепции – информация, встраиваемая в продукт по мере его продвижения по стадиям производства и позволяющая реализовывать полностью гибкое производство. В настоящее время формируется система глобальной автоматизации (см. подробнее http://ua.automation.com/content/o-chem-govorili-na-hannover-messe-promyshlennost-4)

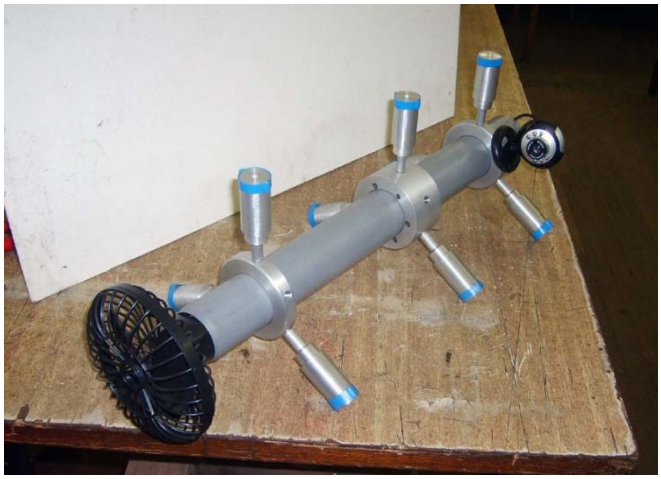


Рисунок 1 –Автономныйшагающийадаптивныйроботдлядиагностикигазопроводов

Рисунок 2 – Примерывыявленныхдефектовтрубы

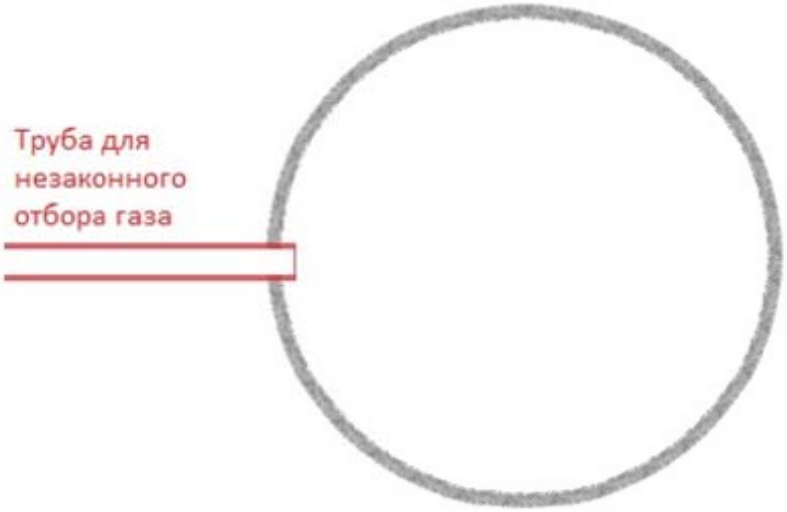


Рисунок 3 – Выявление незаконных врезок в газопровод

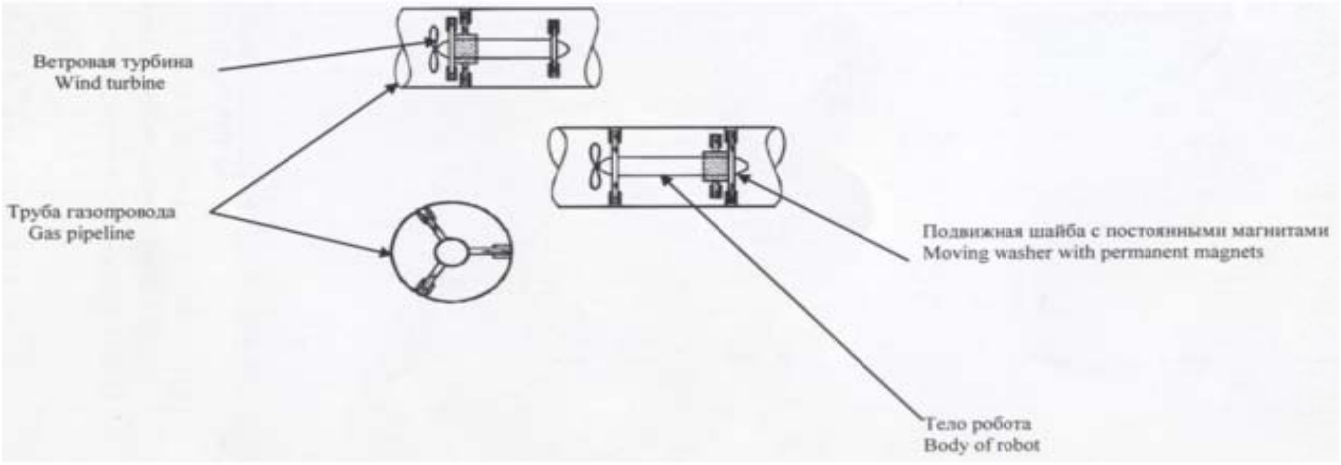


Рисунок 4 – Принцип перемещения робота в трубе

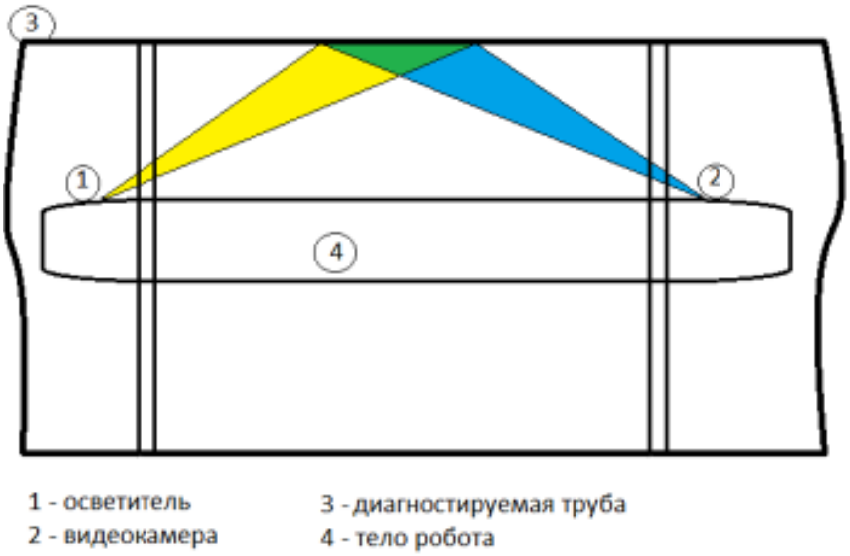


Рисунок 5 – Визуальная диагностика в косых лучах

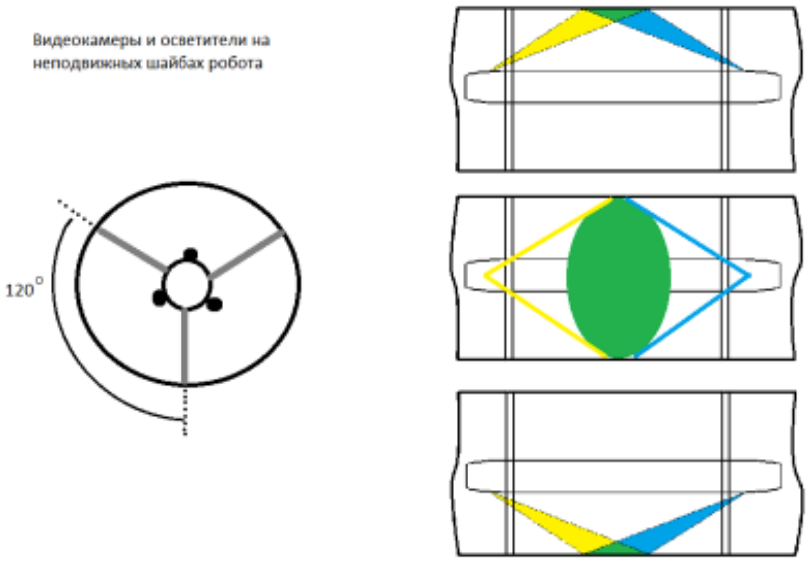


Рисунок 6 – Построение развертки внутренней поверхности трубы

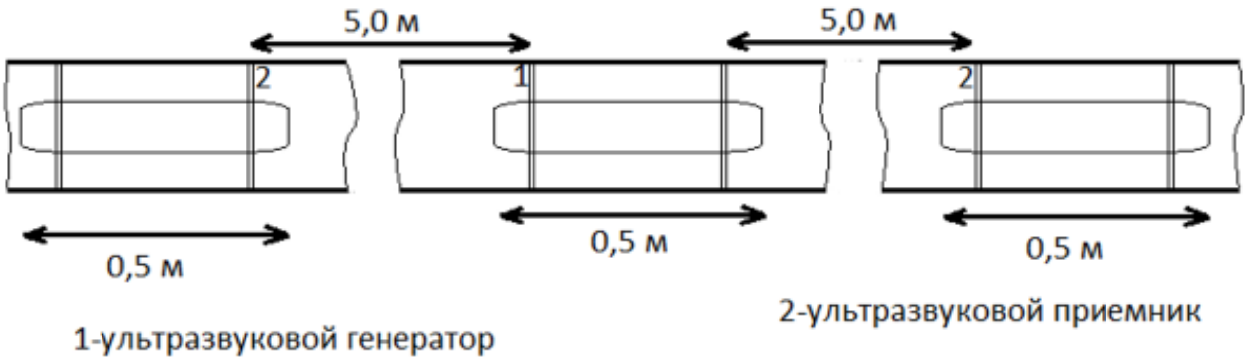


Рисунок 7 – Диагностика с помощью группы роботов

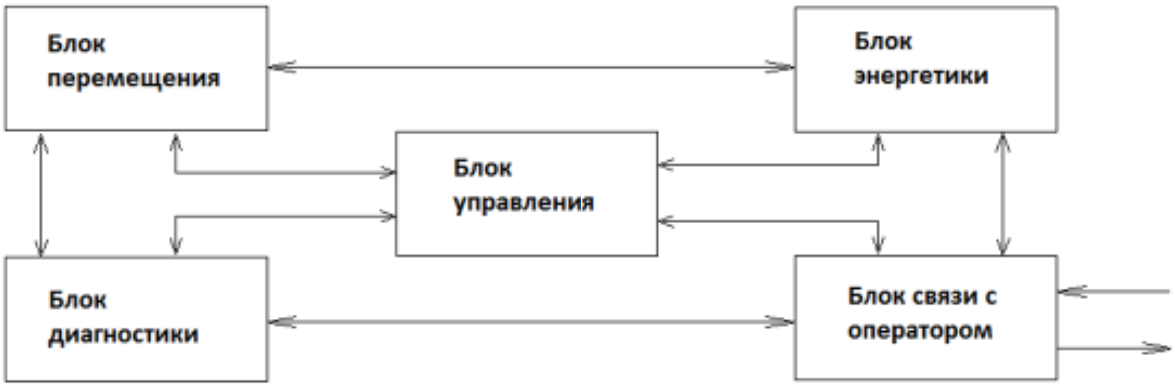


Рисунок 8 – Блок-схема системы управления роботом

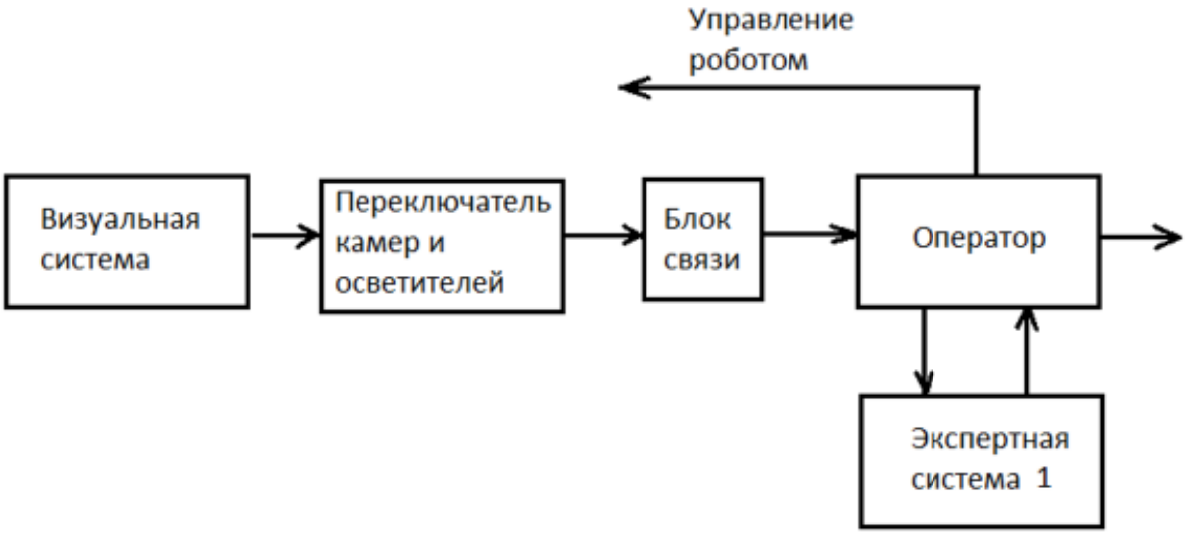


Рисунок 9 – Экспекртная система для диагностики

Экспертные системы

- Экспертные системы накапливают опыт операторов по диагностике трубопроводных систем, которые различаются размером и типом труб, условиями их эксплуатации и видами дефектов.
- Существуют экспертные системы для диагностики газоводов- АМИД-ЭКСПЕРТ, АВРОРА-2000 и др., но они не приспособлены для работы с нашим роботом, они нуждаются в существенном развитии.
- Нами разработана оригинальная экспертная система.

Коммертизация проекта

1. На выставке в Ганновере по нашему роботу подписано 15 протоколов о намериниях с различными иностранными фирмами.
2. Чтобы реализовать эти намериния необходимо дальнейшее патентирование разработки - в процессе подготовки 11 новых патентов.
3. В настоящее время в качестве вычислительной базы используются контроллеры, но в промышленном примнении они не проходят по климатике - необходимо работать в диапозоне -60 до +0 градусов Цельсия. Сейчас подбираетсч новая эленентная отечственнаяя база.
4. Потребность в таких роботах - свыше тысячи штук по оценке Газпрома. Ориентировочная стоимость от ста тысяч до миллиона рублей. Необходимо создание малого инновационного предприятия для разработки и производства таких роботов.

E.S. Lomaev, O.A. Shmakov, A.V. Rogov, D.M. Korolev

SMALL-SIZED TREADED PLATFORM WITH DEPENDENT ARMS

SPbPU,CRDI RTC, Saint-Petersburg
e.lomaev@rtc.ru

Abstract

This article describes the main application areas of small-sized reconnaissance robots. Layout scheme of small-sized tracked reconnaissance robot is presented.

Keywords: Small-sized platform, treaded chassis, dependent arms, motor-track.

Е.С. Ломаев, О.А. Шмаков, А.В. Рогов, Д.М. Королев

МАЛОГАБАРИТНАЯ ПЛАТФОРМА НА БАЗЕ ГУСЕНИЧНОГО ШАССИ С ПАРОЙ ЗАВИСИМЫХ РЫЧАГОВ

СПбПУ, ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург
e.lomaev@rtc.ru

Аннотация

В статье рассмотрены основные области применения малогабаритных разведывательных платформ. Дано описание компоновочной схемы малогабаритной разведывательной платформы с гусеничным шасси.

Ключевые слова: малогабаритная платформа, гусеничное шасси, зависимые рычаги, мотор-гусеница.

Современные тенденции проведение антитеррористических и военных операций требуют применения малогабаритных робототехнических платформ высокой проходимости для осуществления аудио-визуальной разведки, доставки специальных средств, работы в режиме ретранслятора для передачи ауди-визуальной информации и команд управления, а также использования робототехнических платформ в качестве установщика активных помех.

Малогабаритная разведывательная платформа (рисунок 1) представляет собой гусеничное шасси с двумя независимыми, приводными мотор-гусеницами (поз.1) и парой зависимых, приводных рычагов (поз.2). Установка пары зависимых приводных рычагов значительно увеличивает проходимость платформы.Управление вращением двигателей мотор-гусениц осуществляется с использованием обратной связи по положению вала двигателя. Также платформа оснащена антенной приема-передачи команд управления (поз.4) и антенной передачи аудио-визуальной информации (поз.5). Для установки дополнительных модулей используется установочная площадка (поз.6).

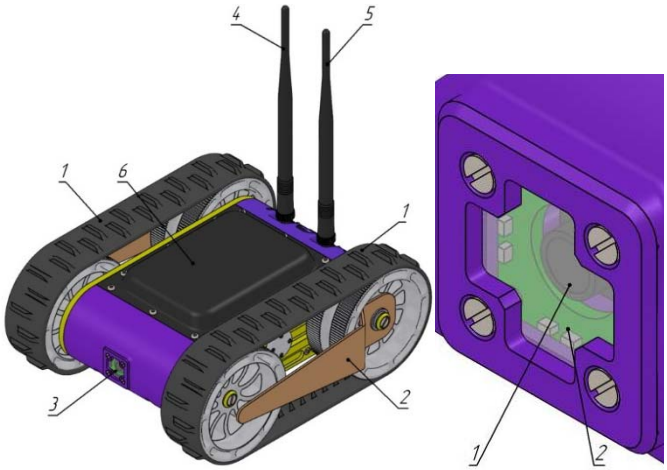


Рисунок 1 – Малогабаритная разведывательная платформа

Рисунок 2 – Модуль визуального контроля

Для возможности контроля управления робототехнической платформой при ее движении, а также проведения визуальной разведки, платформа оснащена двумя модулями визуального контроля (поз.3). Модуль визуального контроля (рисунок 2) состоит из ТВ-камеры высокого разрешения (поз.1) и блока инфракрасной подсветки (поз.2), используемого при работе платформы в условиях пониженной освещенности.

Для проведения аудио разведки платформа оснащена направленным микрофоном. Разведывательная платформа имеет следующие массогабаритные характеристики: масса – 3кг, габаритные размеры (Д х Ш х В) – 255 х 230 х 90 мм.

Малогабаритная разведывательная платформа обеспечивает реализацию специальных функций, таких как:

- передвижение по горизонтальным и наклонным поверхностям на открытом воздухе или внутри помещений;
- установка на нее различной полезной нагрузки;
- осмотр автотранспортного средства;
- установка полезной нагрузки;
- установка на нее дополнительных средств визуального контроля (тепловизора, ТВ-камеры с трансфокатором и т.п.).

Описанная выше малогабаритная разведывательная платформа имеет следующие тактико-технические характеристики:

1) скорость перемещения до 1м/с;
2) перемещение по поверхностям с углом наклона до 35°;
3) возможность перевозки груза общей массой до 5 кг;
4) высота преодолеваемого препятствия до 150 мм;
5) дальность управления на открытой местности до 300 м;
6) время автономной работы до 2 ч.;
7) перемещение по гравийным и песчаным поверхностям, по лестничным маршам.

Конструктивные и схемотехнические решения используемые в данной малогабаритной платформе позволяют устанавливать дополнительное навесное оборудование при помощи универсальных планок крепления Пикатинни (Вивера).

Для определения положения разведывательной платформы в пространстве, а также визуализации габаритной модели отображаемой в диалоговом окне панели управления, используется трехосевой датчик (гироскоп, акселерометр, магнитометр). Для осуществления топографической привязки, а также передачи координат объектов оперативного интереса на платформе установлен GPS-модуль.

Для управления малогабаритной разведывательной платформой разработан пульт оператора на базе планшетного компьютера с приставкой, на которой расположены дополнительные органы управления (джойстики, кнопки и пр.).

Основным достоинством данной малогабаритной разведывательной платформы являются широкие перспективы ее применения, обусловленные принципом построения на базе унифицированных модулей, позволяющих реконфигурировать данную платформу под требуемые задачи.

N. Bykov[1,2], N. Vlasova[1], N. Buzlov[1]

A SMALL-SIZE MOBILE ROBOT: DEPELOPMING OF MOVING MECHANISM

[1]Bauman Moscow State Technical University, Moscow,
[2]Federal Research Center "Informatics and Control", Moscow
nik.bkv@gmail.com, n.s.vlasova@gmail.com

Abstract

Possible schemes for constructing the mechanism of moving the small-sized mobile robot that enables to move on horizontal and vertical surfaces in enclosed spaces are investigated.

Keywords: mobile robots, moving mechanisms, special operations, simulation.

Н.В. Быков[1,2], Н.С. Власова[1], Н.А. Бузлов[1]

РАЗРАБОТКА МЕХАНИЗМА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ МАЛОГАБАРИТНОГО МОБИЛЬНОГО РОБОТА

[1]МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, [2]ФИЦ ИУ РАН, Москва
nik.bkv@gmail.com, n.s.vlasova@gmail.com

Аннотация

Исследованы и проанализированы возможные схемы построения механизма перемещения малогабаритного мобильного робота, позволяющего передвигаться по горизонтальным и вертикальным поверхностям внутри закрытых помещений.

Ключевые слова: мобильные роботы, механизмы перемещения, специальные операции, имитационное моделирование.

Особенности проведения контртеррористических операций в закрытых помещениях требуют разработки специальных малогабаритных мобильных роботов, позволяющих осуществлять наблюдение, аудиоразведку и применение различных нелетальных средств воздействия. При этом с практической точки зрения затруднительно применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в связи с низкой эффективностью управления их движением в ограниченном пространстве, а также высокой вероятностью обнаружения, связанной с особенностями перемещения и производимым шумом. Следствием этого является необходимость разработки роботов, имеющих высокую степень скрытности, низкий уровень шума и наибольшую мобильность. Последнее требование подразумевает разработку специальных механизмов перемещения, дающих возможность малогабаритному роботу передвигаться не только по горизонтальным, но и вертикальным поверхностям. Характерный размер робота ограничен величинами в 20-30 см, вес 1 – 1.5 кг. При этом для обеспечения наиболее широкого внедрения таких малогабаритных роботов требуется максимальное удешевление их разработки и производства, которое может включать в том числе использование технологий 3D печати.

Рассмотрение существующих зарубежных прототипов показало, что в настоящее время не существует универсального механизма, осуществляющего перемещение как по горизонтальным, так и по вертикальным поверхностям. Подобные роботы (по данным открытой печати) в настоящее время при проведении специальных операций не применяются в РФ. В США существуют подобные разработанные малогабаритные роботы-разведчики iRobot 110 FirstLook (вес 2.2 кг, габариты 25x23x10 см) с возможностью установки дополнительных модулей в виде специальных камер, биохимических датчиков и др. Однако, они перемещаются только по плоским поверхностям и преодолевают ступеньки. Анализ состояния развития этой тематики в РФ позволяет сделать заключение об острой необходимости проведения разработок в этом направлении. В то же время ведутся интенсивные зарубежные работы по созданию роботов, способных к перемещению по вертикальным поверхностям [1-9]. К наиболее известным вариантам следует отнести роботов семейства LARVA, city Climber, Max V [4] (Германия, вакуумный механизм), CSIC [5] (Испания, магнитный механизм), Stickybot (Стенфордский университет) [6], японский робот-паук ASTERISK и другие. Анализ зарубежных публикаций показывает, что поиск механизмов реализации вертикального перемещения роботов является весьма актуальной задачей. Существует много предложений по конкретной реализации этого механизма. В ряде работ [5, 6] для этой цели используется механизм создания вакуума под действием насоса, обеспечивающий силу прижатия ноги робота, достаточной для удержания его на вертикальной поверхности. Такой механизм представляется наиболее простым, универсальным и надежным. В то же время существуют и другие способы. Например, в

2015 г. [8] был предложен вариант колесного робота, взбирающегося по стенам благодаря расположенным на колесах миниатюрным иглам. Тогда же в работе [9] был разработан робот, использующий пропеллеры, регулирующие силу прижатия к стене. Такой вариант, однако, не подходит для реализации в проекте в силу излишней шумности. В работе [10] предложен ползущий робот, сцепление которого с вертикальными поверхностями основано на механизме электроадгезии. Роботы типа Stickybot [6] являются перспективными, но в то же время они достаточно сложны и предъявляют к производству высокие экономические требования. Имеются и другие механизмы, специфически ограничивающие области использования роботов, например, магнитные [12].

Существующие механизмы перемещение по вертикальным поверхностям можно укрупненно разделить на несколько групп:

1. Магнитные механизмы.
2. Вакуумные механизмы.
3. Механизмы, основанные на создании прижимающей силы.
4. Бионические механизмы.

При этом не рассматриваются варианты, заведомо не подходящие по критерию шума, а также такие, которые способны преодолевать относительно небольшие препятствия (например, OCTOPUS [13]).

Типичным представителем первой группы механизмов перемещения является робот, рассмотренный в [12], предназначенный для проверки утечек на кораблях. Этот робот состоит из 4 независимых мотор-колес. На каждом колесе, для удержания робота на магнитной тонкой пластине действует магнитная сила в 170 Н и еще по 90 Н на каждое небольшое колесо на подъемнике. Маленькие колеса используются для прохождения щелей размером до 40 мм. Вес робота составляет приблизительно 10 кг. Размеры 200x200x300 мм. Данный робот способен передвигаться только по стенкам толщиной 1.4 мм, для того, чтобы передвигаться по стенкам толщиной 0.7 мм его масса должна быть уменьшена вдвое.

Представителями второй группы являются CityClimber [4] и робот, рассматриваемый в [7]. Первый прототип способен передвигаться как по стенкам, так и по потолку. Сцепление с вертикальной поверхностью производится с помощью вакуумного устройства с ротором, которое состоит из крыльчатки и воздухоотвода. Второй робот оснащен механизмом перемещения, который представляет собой две гусеницы, на которых расположены по 12 присосок. Он передвигается по стенкам со скоростью, около 15 м/мин. Вес его составляет около 14 кг. Размеры соответственно 460x460x200 мм. Данный робот был протестирован только на гладкой поверхности, поэтому до конца не ясно, возможно ли использование в реальных условиях.

К третьей группе относятся преимущественно колесные механизмы, компенсирующие реакцию опоры за счет создания механических сил, например, использования дополнительных пропеллеров [10].

Четвертая группа механизмов перемещения использует бионические принципы, такие как лапы геккона [6] или механизм врезания [9]. Такие механизмы требуют особой технологии.

Наиболее характерные из рассматриваемых вариантов сведены в таблицу 1.

Таблица 1. Характерные особенности роботов-аналогов

Условное название робота	**Способ движения**	**Преимущества**	**Недостатки**
City-Climber	Колесный, с использованием роторного пакета	Передвижение по любой поверхности	Потенциально высокий уровень шума
Magnetic Wall Climbing Robot for Thin Surfaces with Specific Obstacles	Магнитные колеса	Передвижение по тонкой металлической поверхности с малыми магнитными силами	Может двигаться только по гладкой магнитной поверхности, большие габариты,не может переходить с горизонтальной поверхности на вертикальную
wall-climbing robot using a tracked wheel mechanism	Гусеницы с присосками	Высокая скорость передвижения	Необходима гладкая поверхность для передвижения. Большие габариты.
FAMPER	Гусеницы	-	Робот предназначен для

			трубопроводов
A Novel Propeller–Type Climbing Robot for Vessels Inspection	Колеса с одним пропеллером	Инновация среди лазающих роботов	Потенциально высокий уровень шума
VertiGo	Колеса с двумя пропеллерами	Новый метод применения пропеллеров	Потенциально высокий уровень шума
Tbot	Колесо с шипами и хвостом	Передвижение по шероховатым поверхностям типа бетона и кирпича	Потенциально высокий уровень шума. Вероятно, закрепление на нем других устройств сделает его не способным к перемещению.

Проведенный анализ показывает, что использование существующих разработок для создания универсального робота, позволяющего перемещаться как по горизонтальным, так и по вертикальным поверхностям весьма затруднительно.

Исходя из этого, рассматриваются другие механизмы, учитывающие особенности использованияробота для проведения специальных операций. В первую очередь к таким механизмам относятся использование специальных клеящих веществ и принципа электроадгезии.

Работа поддержана РФФИ (грант № 16-29-0959616_офи-м).

1. Черноусько Ф.Л., Болотник Н.Н., Градецкий В.Г. Мобильные роботы: проблемы управления и оптимизации движений //XII Всероссийское совещание по проблемам управления. ВСПУ - 2014. Москва 16-19 июня 2014. С. 67-78.
2. Dethe R.D., Jaju S.B. Developments in Wall Climbing Robots: A Review // International Journal of Engineering Research and General Science Volume 2, Issue 3, April-May 2014.
3. Fish S. UGV's in future combat systems, Proceedings of the SPIE-unmanned Ground Vehicle Technology VI, Orlando, USA, (2004), 288–291.
4. Schmidt D., Berns K. Climbing robots for maintenance and inspections of vertical structures—A survey of design aspects and technologies // Robotics and Autonomous Systems, V. 61, I. 12, 2013, Pp. 1288–1305
5. Panich S. Development of a Wall Climbing Robot // Journal of Computer Science 6 (10): 1185-1188, 2010.
6. Kim S. et al. Smooth Vertical Surface Climbing With Directional Adhesion // IEEE Transactions on Robotics, V. 24, No. 1, 2008. Pp. 1-10.
7. Hwang Kim et al. Development of a wall-climbing robot using a tracked wheel mechanism // Journal of Mechanical Science and Technology 22 (2008) 1490~1498.
8. Gimenez A., Abderrahim M., Balaguer C. Lessons from the Roma I inspection robot development experience // Proceedings of the 5th International Conference on Climbing and Walking Robots, pp. 913-920, Karlsruhe, Germany 2001/.
9. Liu Y. el al. A Wheeled Wall-Climbing Robot with Bio-Inspired Spine Mechanisms // Journal of Bionic Engineering 12 (2015) 17–28.
10. Alkalla M.G., Fanni M.A. and Mohamed A.M. A Novel Propeller–Type Climbing Robot for Vessels Inspection // 2015 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM) July 7-11, 2015. Busan, Korea.
11. Hongqiang Wang, Akio Yamamoto and Toshiro Higuchi. A Crawler Climbing Robot Integrating Electroadhesion and Electrostatic Actuation. Int J Adv Robot Syst, 2014, 11:191. doi: 10.5772/59118.
12. Fischer W., Tache F., Siegwart R. Magnetic Wall Climbing Robot for Thin Surfaces with Specific Obstacles // Field and Service Robotics, Volume 42 of the series Springer Tracts in Advanced Robotics pp 551-561.
13. LauriaM., PiguetY., SiegwartR. OCTOPUS: An Autonomous Wheeled Climbing Robot, in Proceedings of the 5th International Conference on Climbing and Walking Robots, Publishedby Professional Engineering Publishing Limited, Bury St Edmunds and London, UK. 2002.

V.K. Barbasov

AEROD – SYSTEM OF LANDING/RECHARGING FOR UNMANNED VERTICAL-TAKEOFF-AND-LANDING DRONE. USED FOR MAKING DRONS' AUTOMATED NETWORKS TO MONITOR AREAS AND INFRASTRUCTURE GUARDING

LLS Shooting from air, Moscow
vyacheslav@barbasov.ru

Abstract

In article system of landing recharging for unmanned vertical-takeoff-and-landing drone is considered. The system is used for solving such tasks as aerial phototopographic survey (аэрофототопографическаясъемка) and monitoring areas or similar tasks if standard UAV automatic landing mode could be dangerous or unstable.

In article hardware and software suite for making base stations communication networks there flying drons produce on-line monitoring and cargo delivery is offered.

This system allows drons to operate independently every day during the moths or fly years in case of rare flies.

Keywords: pilotless aircraft, UAV, remote-piloted vehicle, copter, remotely piloted aircraft system, monitoring.

В.К. Барбасов

AEROD - СИСТЕМА ПОСАДКИ/ПОДЗАРЯДКИ ДЛЯ БЕСПИЛОТНИКОВ ВЕРТИКАЛЬНОГО ВЗЛЕТА/ПОСАДКИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ, АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СЕТЕЙ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ДРОНОВ

ООО «Съемка своздуха», Москва
vyacheslav@barbasov.ru

Аннотация

В статье рассказывается о системе посадке для беспилотных летательных аппаратов вертикального взлета/посадки. Система может быть применена везде, где есть необходимость применения летательных аппаратов для аэрофотосъемки и мониторинга или других задач, но нет возможности гарантировано и безопасно для окружающих посадить аппарат в автоматическом режиме обычным способом.

В статье описан программно-аппаратный комплекс, для создания сети, между которыми будут летать дроны для целей оперативного мониторинга и доставки грузов. Данная система позволит дрону автономно функционировать месяцами ежедневно выполняя полеты или годами в случае редких полетов.

Ключевые слова: беспилотник, БПЛА, БВС, автономный беспилотник, воздушное судно, авиационная система, беспилотный мониторинг.

Введение

Фильмы о будущем пророчат нам огромное количество дронов летающих по улицам и участвующих практически во всех сферах человеческой жизнедеятельности.

Что же нас отделяет от такого будущего?

Это искусственный интеллект и автономность донов.

Для решения второго вопроса, есть 2 варианта дополняющих друг друга. Первый это увеличение времени полета за счет улучшенных источников тока (топливные элементы, и т.д.), второй это создание базовых станций(БС)(рис 1), по которому мы и пошли.

Кому и зачем это нужно уже сейчас и где это будет экономически обоснованным.

Рисунок 1 – Схема работы системы

Первое, это задача автономного мониторинга локального объекта. Проще говоря, чтобы на круглосуточном дежурстве был один или несколько дронов, но при этом, чтобы это было коробочное решение, без необходимости подготовки дополнительных специалистов.

Следующее применение, это когда дрон выполняет мониторинг протяженного объекта и садиться на следующую базовую станцию за 5, 10 или 50км. Это мониторинг сложных участков протяженных объектов – ЛЭП, нефте-газопроводы или участок границы с ущельями.

И третий вид задачи, это система мониторинга города. Где какое-то количество базовых станций расположены по всему городу и на дежурстве у пожарных у полиции у предприятий и администрации есть свои дроны, которые выполняют свои задачи, например осмотр неблагополучных территорий, проверка места правонарушения, ДТП, пожара, митинга.

Или доставка грузов-документов обмен, которыми между некоторыми организациями происходит десятки раз в день.

В целом мировая тенденция развития беспилотных систем показала, что появление «базовых станций» зарядки-посадки для дронов это вполне логичная ступень в развитии беспилотной отрасли, это своего рода аналог бензозаправки для автомобиля или аэропорта для самолета.

Что представляет собой “базовая станция”?

Это небольшое устройство, которое закрепляется в метре от стены и в нескольких метрах от земли.

Рисунок 2 –фото «якоря»

Рисунок 3 –фото БПЛА севшего на базовую станцию

Устройство выполнена из композитных материалов и к ней подведено электропитание, которое проходит через преобразователь питания и зарядное устройство и заряжает аккумулятор беспилотника. Внутри базовой станции (рис. 3), находится камера системы наведения и видеопередатчик, передающий картинку на аппарат, для корректировки курса подлета бепилотника.

Также внутри базовой станции находятся створки фиксации якоря аппарата, через эти створки организован электрический контакт между базовой станцией и «якорем» аппарата. Сверху базовой станции установлена метеостанция, измеряющая скорость и направление ветра, и другие параметры.

На самом аппарате, установлен вертикальный «якорь» (рис. 2), через который происходит заряд аккумулятора аппарата. Также на аппарате установлены метки, для системы наведения.

Беспилотник подлетает, и, находясь на высоте 50м над базовой станцией, дает сигнал о своем приближении, и станция открывает створки для захода аппарата. Аппарат снижается в нескольких метрах от базовой станции и на несколько метров ниже нее, затем подлетает подстанцию и, используя точную систему наведения, влетает встанцию, створки закрываются и фиксируют аппарат.

Беспилотник переходит в режим заряда, но при получении нового задания, в любой момент может полететь выполнять его (рис. 4).

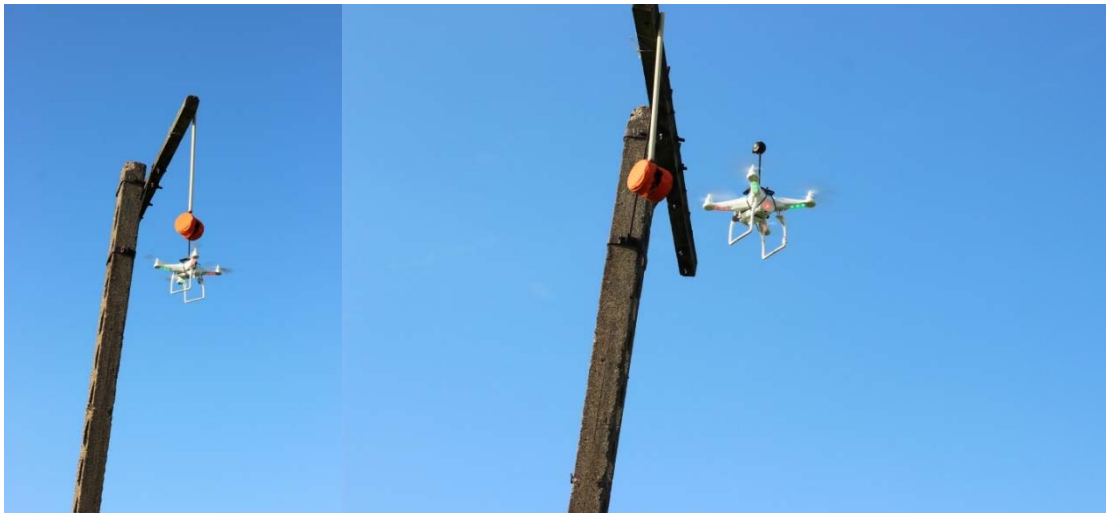


Рисунок 4 – Подлет и попадание в зону БС

В чем преимущество нашего варианта от решений компаний CopterZone, H3Dynamics (рис. 5), Luftera(рис. 6), Karlsson.project, Boeing (рис. 7) и других? Задача ведь не нова.

Рисунок 5 – H3Dynamics

Рисунок 6 – Luftera

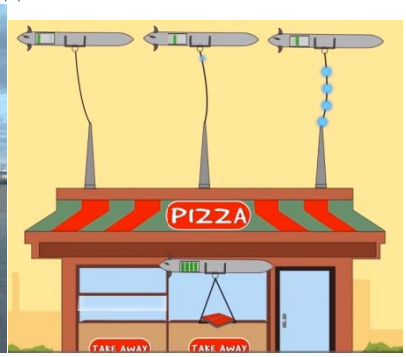


Рисунок – 7 Boeing

Под любым аппаратом вертикального взлета/посадки создается «воздушная подушка», которая вызывает переотражения воздушных масс, когда аппарат находится близко к земле или к стене. Это явление ухудшает точность посадки даже при условиях закрытого помещения до десятков сантиметров. При сильном ветре, задача точной посадки становится в несколько раз сложнее.

В нашем варианте системы по определению не возникает проблем с отражающимися ветровыми потоками, что убирает при посадке аппарата неконтролируемую паразитную ошибку.

Обсуждая погодные ограничения, можно провести сравнение между«фонарным столбом» (наша система) и «песочницей» (классическая система)? На песочницу будут постоянно падать осадки, мусор, пыль, осенью там будет листва, весной наст, а зимой сугроб и с этим ничего не сделаешь. Необходимо дополнительно продумывать системы очистки и разморозки, встраивать их, что влияет и на надежность и на цену, наша система просто по самой идее лишена этих проблем.

В нашей системе нет необходимости в свободном пространстве, тем более его не так уж и много на таких объектах как корабли, морские платформы и т.д., ее за пару минут, можно закрепить на любом фонарном столбе.

Корпус для нашей системы печатается на 3D принтере и по форме и размерам похож на банку из-под краски, классические системы должны состоять из очень прочных материалов и быть намного больше, что само по себе повлечет гораздо большую стоимость.

В оперативности, наша система тоже выигрывает. Так как аппарат уже фактически находиться в воздухе на определенной высоте еще до включения моторов.

Система «Город»

Это программно-аппаратный комплекс, основной задачей которого является оперативный мониторинг любой территории в городе. (Рис 8)

Рисунок 8 – Блок-схема работы системы «Город»

Система может использоваться силовыми и административными службами для следующих задач:

- Оперативный мониторинг участков, где в данный момент происходит пожар или правонарушение (разбой, убийство, и т.д.)
- Поиск пропавшего оборудования, автомобилей, людей, животных, на закрытых территориях
- Плановый мониторинг неблагополучных или особо опасных территорий (стройки, пром. зоны)
- Контроль проведения массовых мероприятий.

Кроме того, любой пользователь может заказать услугу, по мониторингу интересующего его незакрытого участка территории.

Также систему можно использовать и для передачи грузов, как между станциями, так и с выбросом груза на маршруте.

При использовании системы в силовых структурах, схема работы следующая:

При получении адреса или района, где происходит правонарушение на пульт дежурного (рис.9). Дежурный вводит адрес (отмечает на карте) дом или район в специализированную ГИС систему – «UAVGIS» (рис. 10)

Рисунок 9 – Беспилотник на базовой станции у отделения полиции

ГИС система определяет, какое количество дронов и с каких базовых станций, можно применить для данной задачи. При необходимости дроны “снимаются” с маршрутов, в том числе коммерческие и грузовые. В зависимости от задачи и количества дронов, каждому дрону определяется его маршрут, с условием, чтобы покрыть как можно большую площадь при мониторинге и не столкнуться в воздухе.

Сигнал от оператора уходит на башню управления, которая находиться на одном из самых высоких мест в городе.

С нее раздаются команды на дроны, участвующие в выполнении задания. Для получения видеосигналов с дронов, в сторону полета дронов, направляется видео антенна с узкой диаграммой направленности, и полученный видеосигнал отправляется оператору.

Оператор выбирает дрон и при необходимости может его снизить, для более детального рассмотрения интересующего объекта.

Рисунок 10 – Скриншот система «SmartDrones» внутри ГИС «UAVGIS»

Слои ГИС «UAVGIS»

1) 3D модель города.
2) Плоская карта города с отметками высот.
3) Карта Единой Системы Органов Воздушной системы (аэродромы, временно и постоянно закрытые территории, местные воздушные линии).
4) Погодная карта (скорость и направление ветра, температура, осадки).
5) Карта Росреестра.
6) Карты закрытых территорий (военные, ФСИН, и другие силовики).
7) Пользовательские карта (снятые материалы с воздуха и другие важные метки).
8) Карты магнитных аномалий и т.д.

При организации полетных заданий ГИС система учитывает следующие параметры:

1) Емкость аккумулятора, каждого из дронов, который может участвовать в задаче.
2) Погодные условия, полученные на основе метеостанций, установленных вместе с базовыми станциями (легким, перегруженным дронам, намного тяжелее бороться с ветром, чем тяжелым дронам летающим на уровне газа 60%).
3) Наличие закрытых территорий, которые необходимо облетать (аэропорты, военные объекты, зоны с закрытым воздушным пространством).
4) Наличие необходимой полезной нагрузки на борту аппарата.

На основании этих и других параметров ГИС система решает, как построить маршрут нескольких разных по параметрам дронов, в том числе и разного типа (самолетных и мультироторных), с учетом их прибытия и убытия в разное время, так чтобы поставленная задача по мониторингу местности, была решена наиболее полно. При этом система может в любой момент пересчитать решения, при появлении новых факторов, например, выбытие одного из дронов по разным причинам.

Заключение

Внедрение систем посадки, для увеличения автономности дронов с целью оперативного мониторинга и доставки грузов, это следующий логичный шаг в развитии беспилотных систем, а внедрения на их основе системы «Город», следующий шаг по грамотному совмещению существующих решений, который еще на шаг приблизит нас к будущему, и весь вопрос в том, кто сделает эти шаги первым.

K.A. Smirnov

COMBINED ALGORITHM TO CONTROL AUTONOMOUS VEHICLE FOR TRACKING WITH MAXIMUM POSSIBLE SPEED

Bauman Moscow State Technical University, Moscow
smk.robotics@gmail.com

Abstract

In this article is described a method of controlling autonomous vehicles along a trajectory in order to reach a maximum speed. This method is used for solving the problem of autonomous vehicle motion at speed exceeding 20 m/s. The objective of this method is the combining two algorithms, which use different mathematical models and track on each of them own virtual mark, in one. The main objective of this scientific paper is the description of the method and opportunities of it's use.

Keywords: autonomous vehicle, automatic control system, model, simulation, motion along a path.

К.А. Смирнов

КОМБИНИРОВАННЫЙ АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫМ АВТОМОБИЛЕМ ДЛЯ ДВИЖЕНИЯ ПО ТРАЕКТОРИИ С МАКСИМАЛЬНО ВОЗМОЖНОЙ СКОРОСТЬЮ

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва
smk.robotics@gmail.com

Аннотация

В данной статье описан метод управления движением беспилотного автомобиля по траектории с максимально возможной скоростью. Данный метод применяется для решения задачи движения беспилотного автомобиля на скоростях, превышающих 20 м/с. Особенностью данного метода является комбинирование в один двух алгоритмов движения, использующих различные математические модели и ориентирующихся каждый на свой виртуальный маяк. Основной целью данной работы является описание метода и перспектив его применения.

Ключевые слова: беспилотный автомобиль, система автоматического управления, модель, моделирование, движение по траектории.

Беспилотные автомобили – одна из самых актуальных тем на сегодняшний день. Все крупные автопроизводители работают над проектами систем управления для гражданских автомобилей. Однако даже на дорогах общего пользования могут возникать экстремальные ситуации. Чаще всего они являются следствием слишком высокой скорости движения. Наибольшую опасность при этом представляет потеря сцепления одного или нескольких колес с поверхностью, особенно, если они сопряжены с резким изменением направления движения. Независимо от способа управления при выполнении экстренных маневров уклонения в чрезвычайных ситуациях необходимо, чтобы система рулевого управления обеспечивала стабильность и точное следование заданной траектории на пределе сцепных свойств колес с дорогой.

Величина данного предела зависит от ряда факторов, таких как: угол поворота колес, крен кузова, тормозное усилие на колесе и многих других. Влияние всех факторов выражается в максимальных значениях продольной и поперечной сил, которые колесо способно воспринять в определенный момент времени.

Превышение предельного значения одной из этих сил влечет за собой потерю сцепления колеса с поверхностью и начало скольжения. Однако вопреки распространённому мнению, потеря сцепления не означает потерю возможности управления. В данной ситуации автомобилем можно и нужно управлять, так как зачастую это является единственной возможностью избежать столкновения.

Предел сцепных свойств не обязательно связан с движением на высокой скорости. Низкий коэффициент сцепления колес с дорогой, особенности конструкции автомобиля (высокий центр масс, узкая колея и т.п.), неправильно рассчитанная кинематика подвески, шины с неоптимальными для данного типа поверхности характеристиками – всё это может стать причиной потери сцепления при, казалось бы, безопасной скорости движения.

Специалисты научно-учебного центра “Робототехника” МГТУ им. Н.Э. Баумана в своей работе столкнулись с данной проблемой и пришли к выводу о необходимости внедрения в уже разработанные и будущие проекты системы, способной управлять беспилотным автомобилем при потере сцепления с дорогой одного или нескольких его колес.

Решением данной задачи занимались и занимаются множество специалистов. Шладовер в своей работе [1] описывал закон управления с упреждением, где потенциальный угол поворота руля определялся кривизной траектории и воздействующими на колеса продольными силами. Его линейный алгоритм имел обратную связь по поперечному отклонению от траектории, углу отклонения направления движения автомобиля от заданной траектории и их производным. Коэффициенты обратной связи определялись с помощью линейного квадратичного регулятора. Использование данных коэффициентов позволило минимизировать ошибку отслеживания траектории при различных частотах. Нагай [2] также использовал линейное квадратичное управление для разработки двух контроллеров рулевого управления с обратной связью для движения по траектории, причём один контроллер использовал в качестве входных данных угол поворота руля, а другой – момент поворота рулевого колеса.

Мамар и Кёниг [3] описывали систему рулевого управления с имитацией поведения водителя. Данная система с обратной связью компенсирует только угол отклонения направления движения автомобиля от желаемой траектории в некоторой точке перед автомобилем, что похоже на поведение водителя при управлении. Позже Рахариджаона [4] представил улучшенную вспомогательную систему рулевого управления, добавив момент поворота рулевого колеса в качестве входных данных, что позволило добиться улучшения показателей стабильности.

Наконец простой, но эффективный подход к решению задачи рулевого управления с обратной связью и упреждением – это разработка системы, основной задачей которой является сделать ошибку продольного отклонения от траектории равной нулю в некоторой точке «опережения» перед автомобилем. Снижение до минимума величины опережения была изучена Хингу и Томизукой [5], которые предложили контролер с линеаризацией входных и выходных сигналов для достижения данной цели. Важнейшим результатом данного исследования стал вывод о том, что рыскание автомобиля может быть компенсировано на любой скорости движения путем введения квадратичной зависимости координаты точки опережения от скорости автомобиля.

Критийкарано и Гердес [7] разработали контроллер рулевого управления для Audi TTS с обратной связью и упреждением, основной особенностью которого было использование в расчётах координат центра удара. Благодаря учёту нелинейности динамических процессов, данный контроллер хорошо работает при больших значениях бокового ускорения (7–8 м/с^2), однако возникают значительные отклонения от траектории при движении на пределе сцепных свойств колес с поверхностью. Талвала [8] применил критерий устойчивости Ляпунова для аналогичной системы управления и определил, что даже при близких к предельным величинам продольных и поперечных сил, воздействующих на передние и задние шины, сохраняется стабильность системы.

Принципиальная схема системы рулевого управления с обратной связью и упреждением представлена на рис. 1. Входными параметрами для упреждающего рулевого управления δ_{FFW}являются текущая кривизна траектории κ и скорость автомобиля U_x. Входными параметрами для рулевого управления по обратной связи δ_{FB} являются поперечное отклонение e и угол отклонения $\Delta\Psi$ от заданной траектории (рис. 2(б)). Итоговая управляющая команда δ является суммой выходных параметров блоков обратной связи и упреждения.

Система управления с упреждением

Задача управления с упреждением заключается в расчете требуемого угла поворота руля для прохождения траектории с известной кривизной и профилем скорости. Это позволяет уменьшить ошибку системы управления с обратной связью, снижает величину отклонения от заданной траектории и позволяет уменьшить общее количество управляющих воздействий. Для увеличения быстродействия, угол поворота рулевого колеса в упреждающей системе должен зависеть только от желаемой траектории и быть независимым от фактического состояния автомобиля (наличие скольжения, заноса задней оси и т.п.).

Структура системы управления с упреждением предполагает, что динамика автомобиля задается плоской велосипедной моделью с соответствующей автомобилю структурой и размерами. Она представлена на рис. 2(а). Это допущение позволяет алгоритму упреждения рассчитывать базовое поведение рулевого управления автомобиля, оставив расчёт влияния эффектов от крена кузова и изменения координат центра масс в системе с обратной связью.

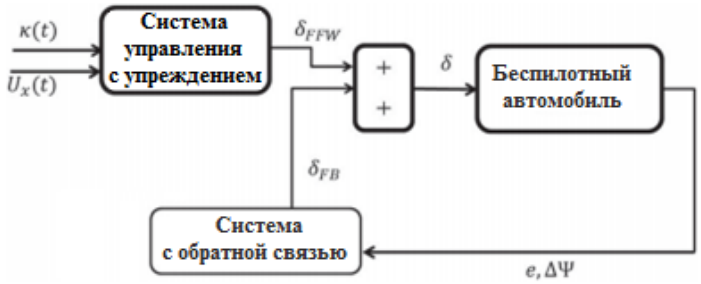


Рисунок 1 – Принципиальная схема рулевого управления с обратной связью и упреждением

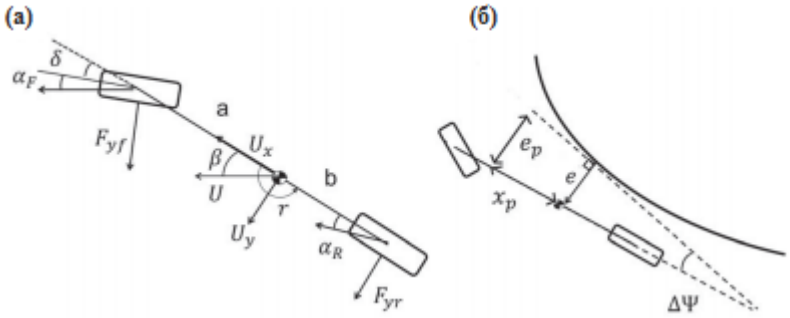


Рисунок 2 – (а) Схема плоской велосипедной модели (б) Прогнозируемая ошибка e_p для расчетов рулевого управления с упреждением

Проблема прогнозирования соответствующих продольных и поперечных сил, которые способна воспринять каждая конкретная шина при автономном движении по траектории, была изучена Крисадой и Гердесом [7]. Уравнения движения с линейными зависимостями для состояний, представленных на рис. 2 имеют вид:

$$\dot{\beta} = \frac{F_{yf} + F_{yr}}{mU_x} - r, \tag{1а}$$

$$\dot{r} = \frac{aF_{yf} - bF_{yr}}{I_z}, \tag{1б}$$

$$\dot{e} = U_x(\beta + \Delta\Psi), \tag{1в}$$

$$\Delta\dot{\Psi} = r - \dot{s}k, \tag{1г}$$

где m и I– это масса и поперечный вращательный момент инерции, s – это дистанция вдоль заданной траектории, r– угловая скорость автомобиля. Подставляя в выражение производных по времени $\dot{e}$ и $\Delta\dot{\Psi}$уравнения (1а) и (1б) получаем:

$$\ddot{e} = \frac{F_{yf} + F_{yr}}{m} - U_x k\dot{s}, \tag{2а}$$

$$\Delta\ddot{\Psi} = \frac{aF_{yf} - bF_{yr}}{I_z} - k\ddot{s} - \dot{k}\dot{s} \tag{2б}$$

В общем случае значения, полученные для поперечных сил передних F_{yf} и задних F_{yr} шин в системе с обратной связью, должны приводить $\ddot{e}$ и $\Delta\ddot{\Psi}$к нулю. Тем не менее, для обычного автомобиля с передними управляемыми колесами прямое воздействие возможно только для сил, возникающих на передних колесах F_{yf} путем изменения угла поворота рулевого колеса δ. Усилия на задних колесах косвенно зависят от угла поворота передних колес из-за увеличения угла скольжения задних покрышек α_r. Поэтому невозможно одновременно устранить поперечное отклонение от траектории и ошибку курсового угла.

Для решения данной проблемы поперечное отклонение e_p смещается в отдаленную точку x_p, расположенную в передней части автомобиля, как показано на рисунке 2(б). Поперечное отклонение в этой спроецированной точке будет иметь значение:

$$e_p = e + x_p\Delta\Psi, \tag{3а}$$

$$\ddot{e_p} = \frac{F_{yf} + F_{yr}}{m} - U_x k\dot{s} + x_p \frac{aF_{yf} - bF_{yr}}{I_z} - x_p\left(k\ddot{s} - \dot{k}\dot{s}\right), \qquad (3б)$$

Критийкарано и Гердес [7] предложили использовать понятие центра удара $x_{cop} = I_z/bm$ в качестве удобной точки проекции для рулевого управления с обратной связью. Подставляя $x_p = x_{cop}$ и $e_{cop} = 0$, получаем упрощенное выражение для силы, воздействующей на переднюю шину:

$$F_{yf} = \frac{mb}{L}(U_x^2 k + x_{cop}\left(k\ddot{s} + \dot{k}\dot{s}\right), \qquad (4)$$

Как видно, в выражении (4) отсутствует сила F_{yr}, воздействующая на задние шины. Остаётся только сила F_{yf}, которой можно управлять с помощью изменения угла поворота передних колес автомобиля.

Система рулевого управления с обратной связью, основанная на смещении поперечного отклонения от траектории в центр удара, показывает хорошие экспериментальные результаты при высоких поперечных ускорениях до 7-8 м/с^2 [7]. Тем не менее при более высоких поперечных ускорениях отклик системы становится недостаточно демпфированным, в результате чего значительно увеличивается величина рыскания. Это происходит из-за нелинейной зависимости между углом поворота колес δ_{FFW} и силой F_{yf}^{FFW}, воздействующей на шины. В общем случае, это отношение зависит от параметров, характеризующих рыскание автомобиля r и угла скольжения автомобиля β:

$$\delta_{FFW} = \frac{U_x\beta + ar}{U_x} - f^{-1}\left(F_{yf}^{FFW}\right), \qquad (5)$$

где $f^{-1}\left(F_y\right)$– обратная зависимость угла скольжения от силы, воздействующей на покрышку. Хотя выражение (5) не содержит явной зависимости от силы, действующей на задние шины автомобиля, функция δ_{FFW} косвенно зависит от неё. Для этого используются коэффициенты рыскания и скольжения задних колес. Это сделано по причине того, что при движении на пределе сцепных свойств математическая формализация данной зависимости становится слишком трудоёмкой.

Чтобы устранить рыскание автомобиля, необходимо упростить выражения для сил, воздействующих на шины путем введения допущения, что в повороте автомобиль движется в установившемся режиме. Принимая $\dot{s} = U_x$, $\ddot{s} = \dot{k} = 0$ в выражении (4) и $\dot{r} = 0$ в выражении (1), получаем величину сил для передних и задних шин:

$$F_{yf}^{FFW} = \frac{mb}{L} U_{xz}^2 k, \qquad (6a)$$

$$F_{yr}^{FFW} = \frac{ma}{L} U_x^2 k, \qquad (6б)$$

При движении в установившемся режиме с небольшими углами поворота, угол поворота руля для упреждения связан с углом скольжения передних и задних колес α_f, α_r и угловой скоростью r через кинематику автомобиля:

$$\delta_{FFW} = L_k - \alpha_f^{FFW} + \alpha_r^{FFW}, \qquad (7)$$

где α_f^{FFW} и α_r^{FFW} – обобщенные углы скольжения передних и задних колес. Выбор углов упреждения бокового увода колес в выражениях (6а) и (6б) осуществляется на основании обратной зависимости $f^{-1}\left(F_y\right)$.

Система управления с обратной связью

Целью данной системы является минимизация «будущего» отклонения e_{LA}, которого автомобиль достигнет на расстоянии x_{LA} перед ним (рис. 3).

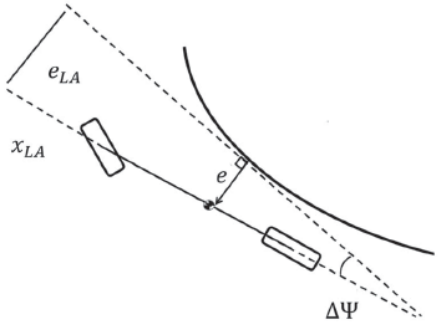


Рисунок 3 – Схема плоской велосипедной модели с «будущим» отклонением

Будущее отклонение и соответствующий закон управления с обратной связью имеет вид:

$$e_{LA} = e + x_{LA}\Delta\Psi, \qquad (8а)$$

$$\delta_{FB} = -k_p e_{LA}, \qquad (8б)$$

где k_P – пропорциональный коэффициент. Законы управления (8а) и (8б) являются ничем иным как системой для управления движением по полосе, описанной в работе Россетер [6], который также предложил рекомендации по подбору k_P и x_{LA}. Характеристики стабильности данной системы при высокой нагрузке на шины продемонстрированы в работе Талвала [8].

Ожидаемые результаты

Внедрение данной системы управления существенно повысит максимальную скорость автономного движения беспилотных автомобилей, что в свою очередь увеличит среднюю скорость движения по маршруту. Данную систему также возможно использовать в качестве дополнительной активной системы безопасности при движении под управлением человека. Такое применение поможет существенно снизить количество аварийных ситуаций, возникающих при недостаточном уровне подготовки водителя.

В том числе для проверки эффективности работы системы планируется создать беспилотный автомобиль на базе машины класса «FormulaStudent», представленной на рис. 4 и принять участие в международных соревнованиях «FormulaStudentDriveless».

Рисунок 4 – Автомобиль класса «FormulaStudent»

1. Shladover S.E., Desoer C.A., Hedrick J.K., et al. Automated vehicle control developments in the path program. IEEE Trans Veh Technol, 1991. – pp. 114–130.
2. Nagai M., Mouri H., Raksincharoensak P. Vehicle lane-tracking control with steering torque input. Veh Syst Dyn Suppl. 2002. – pp. 267–278.
3. Mammar S., Koenig D. Vehicle handling improvement by active steering. Veh Syst Dyn. 2002. – pp. 211–242.
4. Raharijaona T, Duc G, Mammar S. Robust control and μ-analysis with application to lateral driving assistance. In: Proceedings of IEEE Intelligent Transportation Systems; Shangai, 2003. – pp. 247–252.
5. Hingwe P., Tomizuka M. A variable look-ahead controller for lateral guidance of four wheeled vehicles. In: Proceedings of the American Control Conference; Philadelphia, 1998. – pp. 31–35.
6. Rossetter E.J. A potential field framework for active vehicle lanekeeping assistance [dissertation]. Stanford, CA: Stanford University, 2003.
7. Kritayakirana K., Gerdes J.C. Using the center of percussion to design a steering control for an autonomous racecar. Veh Syst Dyn, 2012. – pp. 33–51.
8. Talvala K.L., Gerdes J.C. Lanekeeping at the limits of handling: Stability via Lyapunov functions and a comparison with stability control. In: Dynamic Systems and Control Conference; Ann Arbor; 2008. – pp. 361–368.

V.P. Andreev, V.L. Kim

DEVELOPMENT OF FUNCTIONAL UNITS OF A HETEROGENEOUS MODULAR MOBILE ROBOT

MSTU «STANKIN», International Laboratory «Sensorika»,
International Institute of the New Educational Technologies,
RSUH, Moscow
andreevvipa@yandex.ru, top7733@gmail.com

Abstract

We consider the modular principle for the construction of functional units of mobile robots. The main ideas of this concept and the general structure of the heterogeneous robot are presented. Basic functions of the robot are used to determine the minimum set of functional modules. For one of the simple configurations of the modular robot (the service mobile robot), we develop a motion module that is one of the main modules of the mobile robot. We present the design of this motion module and the result of a mathematical model of its control system. The control system combines the tactical level (for the construction of motion sub-targets and intermediate trajectories) and the execution level. The execution level of control is implemented on the basis of the system of slave control loops.

Keywords: mobile robot, modular robot, heterogeneous modular robot, mechanics of mobile robots, motion along trajectory, path planning, subordinate control loop, control system.

Introduction

Normally, the design of robotic systems (RS) is accompanied by information about the purpose of the device. Accordingly, all the constructive and program decisions made during the design focus on the achievement of the specific purpose by the final device. Because of this, when the scope of application of the RS is changed, the designer has to revise in a varying degree the device construct ensuring its full compliance with the given purpose. One of the modern approaches to robotic design (and to machinery in general) is to divide the device structure into individual functional components. Each component is responsible for some part of the robot functionality. This unit or *module* normally has a simpler structure because it is responsible for a single function only. As one of many components of the robot, the module can be easily replaced by a similar or more advanced module. Then, there is no need to redesign the robot: it will suffice merely to replace it by particular functional units. Therefore, the modular robots can provide higher economic efficiency.

The modular principle in robotics

The modular principle of robot construction has recently emerged as a separate research field originating from the study by Fukuda and Nakagawa [1] published as early as in 1987. The CEBOT robot described by these authors consisted of similar modules–drives and its main purpose was to demonstrate that its configuration can be autonomously modified. Later, the CEBOT-type robots were said to be *homogeneous* robots, i.e., consisting of similar modules. In this paper, we consider another class of modular robots: *heterogeneous* modular robots. In heterogeneous robots, each module is responsible for a single function (or a pair of functions); accordingly, the modules of a single robot constructively may be very different. Heterogeneous robots have the advantage that they are more adapted to performing different tasks because the functionality of modules corresponds to the robot purpose and have *tools* to perform these tasks. However, at this stage, the majority of studies are devoted to homogeneous robots such as M-TRAN, ATRON, and SuperBot [2–4]. In heterogeneous robots, the reconfiguration task takes a back seat, and the versatility, flexibility, and interchangeability of modules becomes important. This fact was well reflected in Thor [5] and SMART [6] robots.

The purpose of this studyis to develop a major functional unit of a modular mobile robot (MR) in the framework of the concept of modular system construction. We consider some specific features of this robot as well as what is meant by reconfiguration here.

The project concept is based on the following main principles of modular MR construction [7]:

1. Principle of constructive and functional independence of each module.
2. Principle of universal hardware and software communication interface and interaction between the modules.
3. Principle of distributed control.
4. Network principle of information-measuring and control system.

5. Each module is involved in the network structure with the help of special-purpose software (drivers).

The first principle means that each module should have a design and software that allow it to operate independently of other modules except power supply and most common instructions. *This means that the design and software of a single module do not affect the operation of another module.*

The second principle requires that the inter-module data communication be strictly standardized and independent of the type of the construction and control system (CS) of modules. This implies the following key feature of the given heterogeneous robot: *the functional reconfigurability*. This means that the inter-module interface should allow modules to execute their *basic functions* as a part of the robot that can be used to solving *different* kinds of tasks under *different* conditions of working environment. The final purpose of the robot determines only the design of modules and, in some cases, their control system, rather than the hardware and software interface of their interaction. For example, a service robot (Fig. 1a) can be converted into a track-mounted robot (Fig. 1b) relatively easily, without a significant change in the design of modules. The configuration of a go-anywhere modular MR (Fig. 1e) requires a change in the design and CS of only the motion module. In the case of transition to the underwater configuration (Fig. 1c), the designs of modules and their control systems should be significantly modified. In all the examples, the data interaction between modules will always be *the same*.

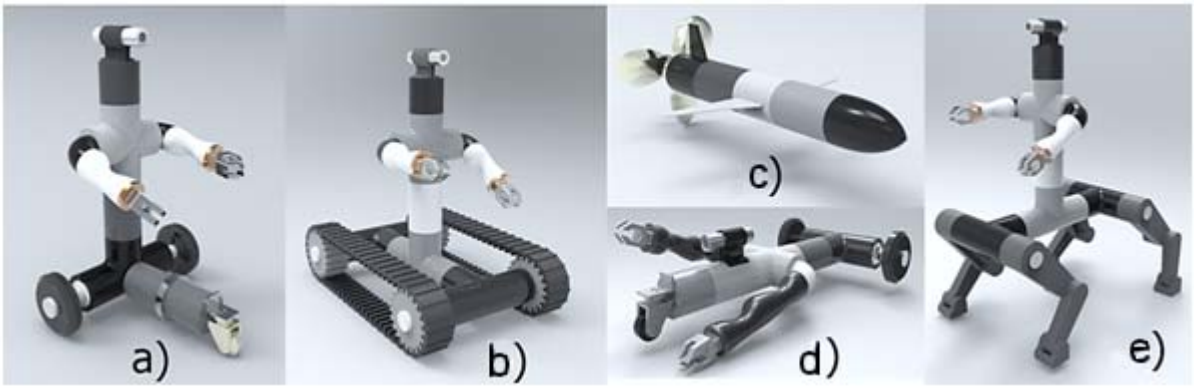


Figure 1 – Different configurations of the heterogeneous modular mobile robot

The third principle determines the hierarchy of interaction between modules. The control of the operation of modules as a unified system is concerted by a special *supervisory control* system, which includes a *control module* as its core. This module forms objective functions for the remaining modules in the framework of the robot purpose. This is reached by dividing this task into common control instructions and their *distribution* between modules. Accordingly, this control instruction corresponds to the functionality of a given module.

The fourth principle is based on the notion that each module is a unit of the local area network (LAN) [8]. As a result, the modular robot is a network structure with modules exchanging information with each other via standard network protocols (in this case, Ethernet).

The fifth principle, which is based on the network structure information-measuring and control system (IMCS) of the robot, serves as a major hardware and software interface between modules. The approach to developing an inter-module communication language is described in [9]. The "principle of drivers" (its application for distributed control is considered in [10]) enables modules to be automatically involved in the common structure of the modular MR through special software (driver). In the future, not only the modules but also other devices manufactured by third parties can be included in the structure of modular MR.

Main aims of the study:

1. Develop a common structure of heterogeneous modular MR where each module is represented as an independent functional unit.
2. Determine the functionality of each module and control instructions that are needed to ensure that the robot in its entirety is fully functioning.
3. Develop the design and control system of the motion module on the basis of the concept of modular MR and information about the robot purpose.

Based on the above-mentioned principles of the construction of heterogeneous modular MR, we have developed a common structure of the modular robot system (Fig. 2).

In this structure, each module corresponds to a certain function. The network control module (NCM) is the main control module responsible for *supervisory* control and *distribution* of common instructions between modules. The NCM interacts with each of the modules via the network hardware and software interface.

Figure 2 shows that this system has four interfaces. As noted earlier, the design and CS of each module are determined by the robot purpose; however, the NCM structure is least dependent of this parameter.

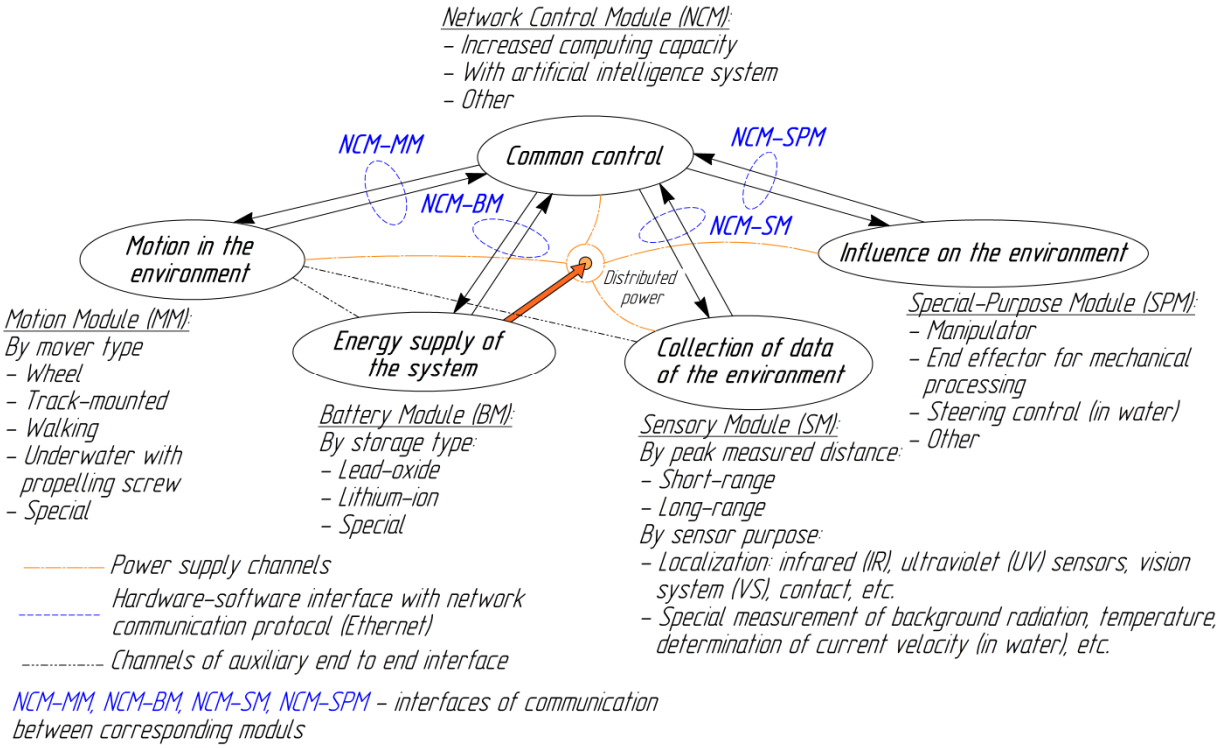


Figure 2 – General structure of heterogeneous modular mobile robot

In this project, the service modular MR is taken as the original configuration (see Fig. 1a) since this is the simplest assembly of the above-mentioned variants that is not subjected to special requirements.

Like other configurations, the service modular MR (according to the structure shown in Fig. 2) consists of the following modules (Fig. 3): 1 – Motion Module (MM), 2 – Battery Module (BM), 3 – Network Control Module (NCM), 4 – Special-Purpose Module (SPM), 5 – Sensory Module (SM). For this variant of the MR, the SPM is a module with manipulators.

The motion module (MM) is one of the main robot modules responsible for the function of motion in the environment (see Fig. 2). Since the service modular MR operates predominantly in indoor areas, the motion module should provide movement on flat surfaces.

The control system of the motion module combines both tactical and execution control levels. The tactical control level directly interacts with the NCM via the NCM-MM interface and receives from it necessary data to execute motion instructions: information about the coordinates and orientation of the robot in initial and final positions, data on the local map (if available), etc. In turn, the NCM receives actual data on the course of the instruction execution along the MM feedback chain.

The tactical level solves the problem of path planning and tracking along the trajectory. In this study, the tactical control level is implemented by the algorithm described in [11]. A similar approach is used for the mobile robot control [12]. Based on these studies, we developed a mathematical model of the CS of the tactical level using *Simulink* (MATLAB) to calculate the angular velocities of MM wheels aimed at its passing along a given trajectory.

The execution level of the CS is based on the slave control loop system: current control subsystem and speed control subsystem. The input of speed control receives mismatch between the desired and actual (received from the sensor) speeds of the wheel. Figure 4 shows a block diagram of the execution level CS for a single drive (right). For the second drive, the CS is constructed similarly.

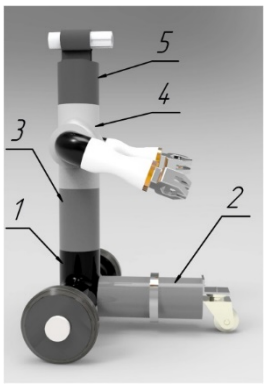


Figure 3 – Service modular mobile robot

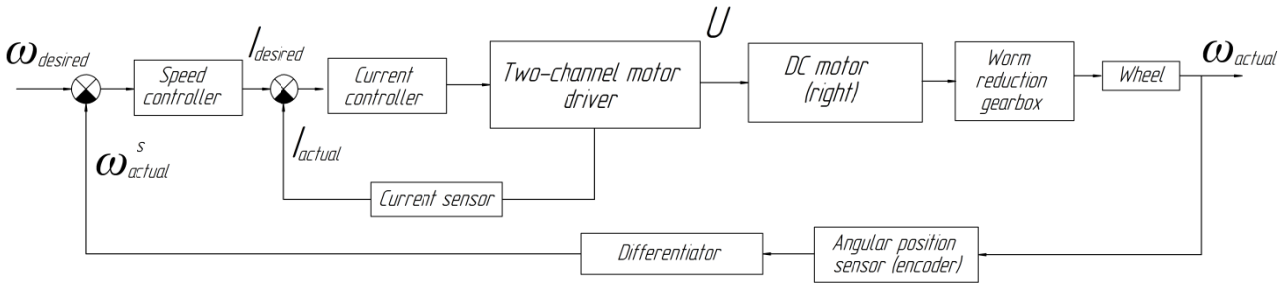


Figure 4 – Structural diagram of the execution level CS for a single drive

We analyzed the mathematical model of MM CS. The mobile robot must travel along a given trajectory with a least deviation from it. It should be noted here we used only a PI speed controller, rather than a current controller. The results of the model experiment are shown in Fig. 5.

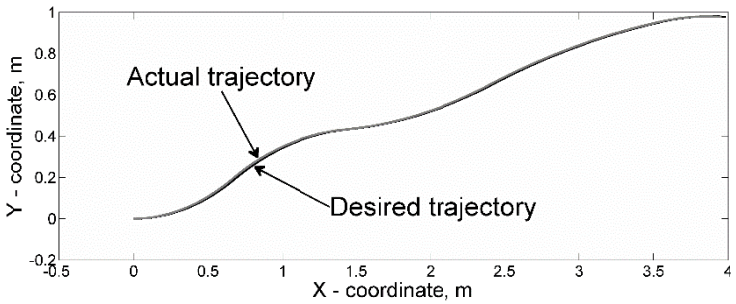


Figure 5 – Desired and actual trajectories of MR motion

The plot shows that the deviation of the actual motion from the desired one is sufficiently small (up to 35 mm) even without the current controller.

Figure 6 shows the isometric section of the MM.

Let us consider some specific features of the MM design. The device consists of individual parts allowing us to relatively easily assemble the module (Fig. 6). The MM design contains two components connected to the drives and an electronic control unit. The MM drive consists of electric DC motor (1) and worm reduction gearbox (2). Gear (3) is connected to shaft (4) at the gearbox output through multilayer clutch (5). The shaft, clutch, frame unit (6), multilayer bearing sleeve (7), wheel (8), and encoder (9) constitute a single unit - *wheel-module* (Fig. 7.). The electronic control unit includes microcontroller-based hardware and software platform (10) and electric motor driver (11).

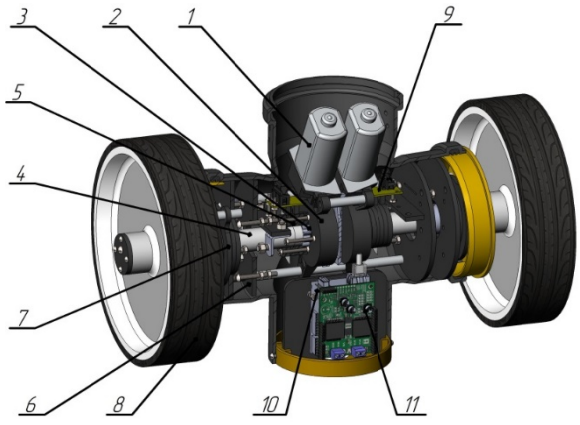


Figure 6 – Motion module`

Figure 7 – Wheel–module

Conclusions

We have formulated the main ideas of the concept of modular heterogeneous mobile robot. The design of the motion module was designed and produced. We created the first and sufficiently simple version of the mathematical model of the MM CS (from simple to complex). Our study demonstrated that the mathematical model of the CS is adequate and efficient. We constructed a battery module as a separate electronic device with a computer system (the details are not considered).

This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, project no. 16-07-00811a.

1. Fukuda T., S. Nakagawa, A dynamically reconfigurable robotic system (concept of a system and optimal configurations), In Proceedings of IECON ’87: 1987 International Conference on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation, 1987.
2. S. Murata, E. Yoshida, A. Kamimura, H. Kurokawa, K. Tomita, and S. Kokaji, M-TRAN: self-reconfigurable modular robotic system, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 7(4):432–441, 2002.
3. E.H. Østergaard, K. Kassow, R. Beck, and H.H. Lund, Autonomous Robots, Design of the ATRON lattice-based self-reconfigurable robot, 21(2):165–183, 2006.
4. Salemi B., M. Moll, and W.-M. Shen, SUPERBOT: A deployable, multi-functional, and modular self-reconfigurable robotic system, In Proceedings, IEEE/RSJ Intl. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pages 3636–3641, Beijing, China, 2006.
5. Lyder A.H., Stoy K., Mendoza-Garcia R.-F., Larsen J.C., and Hermansen P., On sub-modularization and morphological heterogeneity in modular robotics, In Sukhan Lee, Hyungsuck Cho, Kwang-Joon Yoon, and Jangmyung Lee (Eds.), Intelligent Autonomous Systems 12, volume 193 of Advances in Intelligent Systems and Computing, pp. 649-661. Springer Berlin Heidelberg, 2013.
6. J. Baca, M. Ferre, and R. Aracil, A heterogeneous modular robotic design for fast response to a diversity of tasks, Robotics and Autonomous Systems, vol. 60, no. 4, pp. 522–531, 2012.
7. Andreev V.P., and Poduraev Yu.V., Functional–Modular Design of Heterogeneous Mobile Robotic Systems, In Proceedings of the International Scientific and Technical Conference “Extreme Robotics”. – St. Petersburg, 2016 (the present book).
8. Pryanichnikov V.E., Andreev V.P., The Application of Network Technologies to Constructing Group Controlled Systems with Machine Vision for Mobile Robots, In 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. – pp.1167 – 1174.
9. Andreev V.P., and Pletenev P.F., Developing Inter-Modular Communication for Heterogeneous Mobile Robot, In Proceedings of the International Scientific and Technical Conference “Extreme Robotics”. – St. Petersburg, 2016 (the present book).
10. Andreev V.P., Kirsanov K.B., Poduraev Yu. V., Geographically distributed “multi-operator” control of robotized systems using network technologies, In Proceedings of the International Scientific and Technical Conference “Extreme Robotics”. – St.Petersburg: “Politechnika-service”, 2015. – P.67-71.
11. Gulati S., Kuipers B., High performance control for graceful motion of an intelligent wheelchair, In Proc. 2008 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA, May 2008), pp. 3932–3938.
12. Davydov O.I., Platonov A.K., A control algorithm for a differential drive of RB-2 mobile robot, Preprint Keldysh Institute of Applied Mathematics, RAS. Moscow. 2015. No. 25. - pp.4 - 16.

В.П. Андреев, В.Л. Ким

РАЗРАБОТКА ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ УЗЛОВ ГЕТЕРОГЕННОГО МОДУЛЬНОГО МОБИЛЬНОГО РОБОТА

МГТУ «СТАНКИН», МЛ «Сенсорика», МИНОТ РГГУ, Москва
andreevvipa@yandex.ru, top7733@gmail.com

Аннотация

В работе рассматривается модульный принцип построения функциональных узлов мобильного робота. Представлены основные положения концепции и общая структура гетерогенного робота. Согласно базовым функциям робота определен минимальный набор функциональных модулей. Для одной из простых конфигураций модульного робота – сервисный мобильный робот – разработан модуль движения, который является одним из основных модулей мобильного робота. В работе представлена конструкция модуля движения и анализ работы математической модели его системы управления. Система управления сочетает в себе тактический уровень, предназначенный для построения подцелей движения и промежуточных траекторий, и исполнительный уровень. Исполнительный уровень управления реализуется на базе системы контуров подчинённого регулирования.

Ключевые слова: мобильный робот, модульный робот, гетерогенный модульный робот, механика мобильных роботов, движение по траектории, планирование пути, контур подчинённого регулирования, система управления.

Введение

Обычно при проектировании робототехнических систем (РТС) известно целевое назначение устройства. Соответственно все конструктивные и программные решения, принимаемые в ходе проектирования, ориентированы на достижение готовым устройством конкретного целевого назначения. По этой причине изменение сферы применения РТС вынуждает проектировщика в той или иной степени пересматривать конструкцию устройства для его полного соответствия заданной цели. Один из современных подходов к проектированию роботов, да и всей техники в целом, заключается в разбиении структуры устройства на отдельные функциональные составляющие. Каждая такая составляющая выполняет какую-то часть общей функции робота. Этот узел или ***модуль*** обычно обладает более простой структурой, поскольку отвечает только за одну функцию. Модуль, как один из многих компонентов целого робота, проще заменить на аналогичный или более совершенный. Тогда нет необходимости заново проектировать робот – достаточно лишь заменить его те или иные функциональные узлы. Следовательно модульные роботы могут обеспечить бóльшую экономическую эффективность.

Модульный принцип в робототехнике

Модульный принцип построения роботов за последние годы сформировался в виде отдельного направления, основы которого были заложены ещё в 1987 году, в работе Фукуды и Накагавы [1]. Их робот CEBOT состоял из однотипных модулей-приводов, и его основная задача заключалась в демонстрации автономного изменения своей конфигурации. В дальнейшем роботы по типу CEBOT стали именоваться *гомогенными*, то есть состоящими из одинаковых модулей. В настоящей работе рассматривается другой класс модульных роботов – *гетерогенные* модульные роботы. В гетерогенных роботах каждый модуль отвечает за выполнение какой-либо одной функции (или пары функций), соответственно модули одного робота могут значительно отличаться конструктивно. Преимущество гетерогенных роботов заключается в том, что они более приспособлены к выполнению разных задач, поскольку функции модулей соответствуют целевому назначению робота, и они обладают *средствами* для выполнения задания. Тем не менее, на данном этапе бóльшая часть работ посвящена гомогенным роботам: M-TRAN, ATRON, SuperBot [2-4] и др. В гетерогенных роботах задача реконфигурации уходит на второй план, на первое место выходит обеспечение универсальности, гибкости и взаимозаменяемости модулей. Это достаточно хорошо отражено в роботах Thor [5] и SMART [6].

Цель настоящей работы заключается в разработке одного из основных функциональных узлов модульного мобильного робота (МР) в рамках концепции построения модульных систем. Рассмотрим некоторую специфику и особенности данного робота, а также то, что понимается здесь в качестве реконфигурации.

Концепция проекта определяется следующими основными принципами построения модульного МР [7]:

1. Принцип конструктивной и функциональной независимости каждого модуля.
2. Принцип универсального аппаратно-программного интерфейса обмена и взаимодействия между модулями.
3. Принцип распределённого управления.
4. Сетевой принцип построения информационно-измерительной и управляющей системы.
5. Включение каждого модуля в сетевую структуру при помощи специального программного обеспечения (ПО) – драйверов.

Первый принцип означает, что каждый модуль должен иметь такую конструкцию и ПО, которые позволят ему функционировать независимо от остальных модулей, за исключением энергопитания и наиболее общих команд управления. *То есть, конструкция и ПО одного модуля не оказывает влияние на функционирование другого модуля.*

Второй принцип определяет требование к межмодульному информационному взаимодействию, которое должно быть строго стандартизировано и быть независимым от того, какую конструкцию и систему управления (СУ) имеют модули. Отсюда вытекает следующее важное свойство данного гетерогенного робота: *функциональная реконфигурируемость*. Это означает, что межмодульный интерфейс должен позволять модулям выполнять *своибазовые* функции в составе робота, который может быть использован при решении *разного* рода задач и при *различных* условиях рабочей среды. Конечное назначение робота определяет только конструкцию модулей и, в некоторых случаях, их систему управления, но не аппаратно-программный интерфейс их взаимодействия. Например, переход от сервисного робота (рис. 1а) к роботу на гусеничном ходу (рис. 1б) осуществляется относительно легко, без значительного изменения конструкций модулей. Конфигурация модульного МР с

повышенной проходимостью (рис. 1д) потребует изменения конструкции и СУ лишь модуля движения. В случае перехода к подводной конфигурации (рис. 1в) конструкции модулей и их системы управления должны быть изменены значительно. При этом во всех представленных примерах информационное взаимодействие между модулями всегда будет *одним и тем же*.

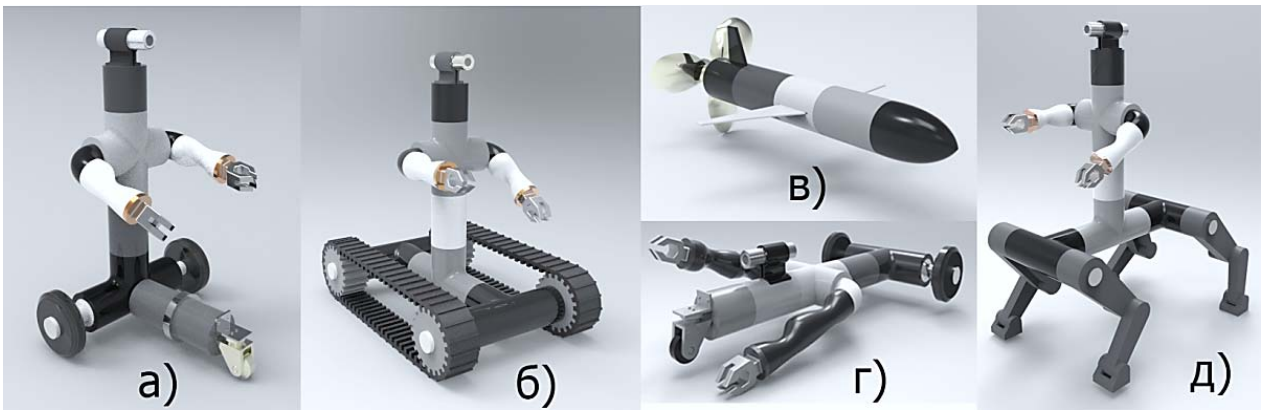


Рисунок 1 – Различные конфигурации гетерогенного модульного мобильного робота

Третий принцип определяет иерархию взаимодействия между модулями. Для организованного управления работой модулей как единой системы создаётся специальная система *супервизорного* управления, ядром которой является *управляющий модуль*. Этот модуль формирует целевые функции для остальных модулей в рамках поставленной перед роботом задачи. Это достигается путём разбиения этой задачи на общие команды управления и *распределения* их между модулями. Соответственно такая команда управления соответствует функции того или иного модуля.

В основе четвёртого принципа лежит представление о том, что каждый модуль является узлом локальной вычислительной сети (ЛВС) [8]. В итоге модульный робот является сетевой структурой, модули которого осуществляют обмен информацией между собой по стандартным сетевым протоколам (в данном случае – Ethernet).

Пятый принцип, базирующийся на сетевой структуре информационно-измерительной и управляющей системы (ИИУС) робота, служит основной аппаратно-программного интерфейса взаимодействия между модулями. Подход к разработке языка межмодульной коммуникации описан в работе [9]. «Принцип драйверов», использование которого при реализации распределённого управления рассмотрено в работе [10], позволяет модулям автоматически включаться в общую структуру модульного МР посредством специального ПО – драйвера. В перспективе возможно включение в структуру модульного МР не только самих модулей, но и других устройств, изготовленных сторонними производителями.

Основные задачи исследования:

1. Разработать общую структуру гетерогенного модульного МР с представлением каждого модуля в виде самостоятельной функциональной единицы.
2. Определить функционал каждого модуля и команд управления, необходимых для обеспечения полноценного функционирования всего робота.
3. Разработать конструкцию и систему управления модуля движения на основании положений концепции модульного МР и информации о целевом назначении робота.

На основании рассмотренных выше принципов построения гетерогенного модульного МР была разработана общая структура модульной робототехнической системы (рис. 2).

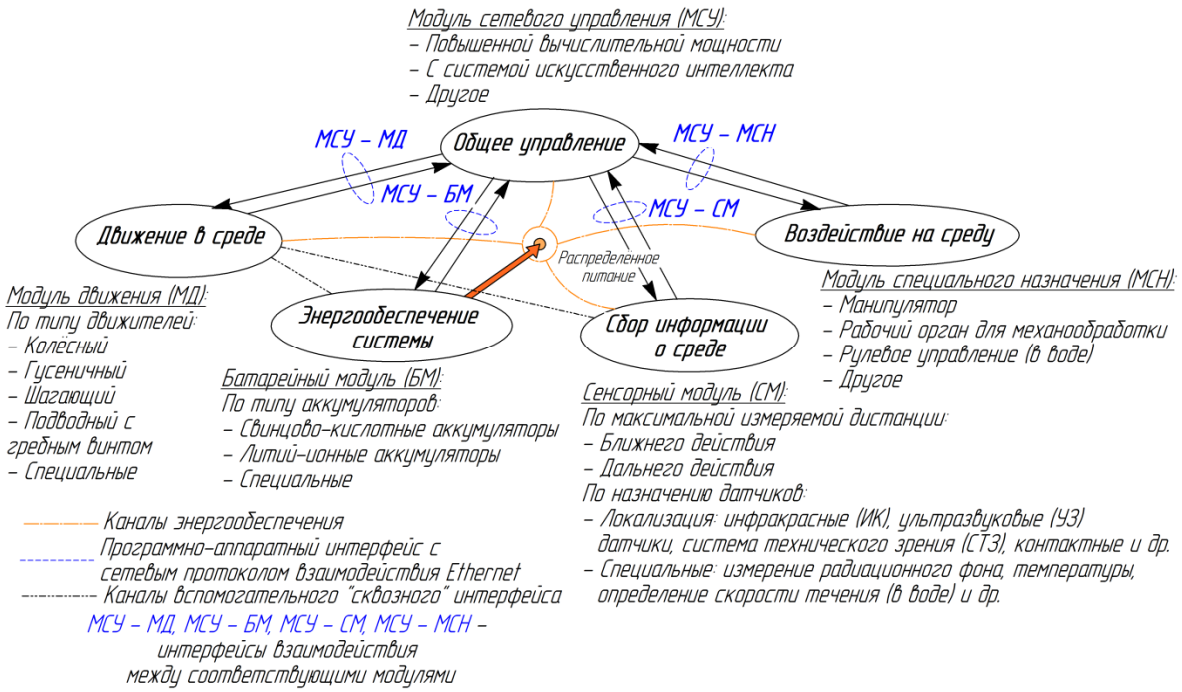


Рисунок 2 – Общая структура гетерогенного модульного мобильного робота

В данной структуре каждому модулю соответствует одна определённая функция. Модуль сетевого управления (МСУ) – основной управляющий модуль, который отвечает за организацию *супервизорного* управления и *распределение* общих команд между модулями. МСУ взаимодействует с каждым из модулей посредством сетевого аппаратно-программного интерфейса. На рис. 2 показано, что данная система включает в себя четыре таких интерфейса. Как было отмечено ранее, конструкция и СУ каждого из модулей определяется целевым назначением робота, однако структура МСУ имеет наименьшую зависимость от этого параметра.

В данном проекте за исходную конфигурацию принимается сервисный модульный МР (см. рис. 1а), поскольку это самая простая сборка из представленных выше вариантов исполнения, к которой не предъявляются специальные требования.

Как и другие конфигурации, сервисный модульный МР (согласно структуре на рис. 2) состоит из следующих модулей (рис. 3): 1 –модуль движения (МД), 2 – батарейный модуль (БМ), 3 – модуль сетевого управления (МСУ), 4 – модуль специального назначения (МСН), 5 – сенсорный модуль (СМ). Для данного исполнения МР в качестве МСН принимается модуль с манипуляторами.

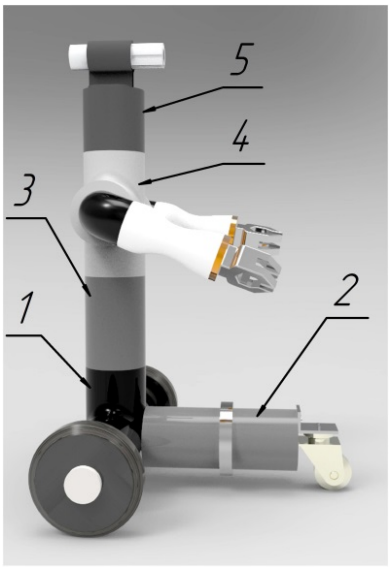


Рисунок 3 – Сервисный модульный мобильный робот

Модуль движения (МД) – один из основных модулей робота, осуществляющий *функцию движения в среде* (см. рис. 2). Так как сервисный модульный МР работает преимущественно в помещениях, модуль движения должен обеспечивать перемещение по плоским поверхностям.

Система управления модуля движения сочетает в себе тактический и исполнительный уровни управления. Тактический уровень управления непосредственно взаимодействует с МСУ посредством интерфейса МСУ⇔МД и получает от него необходимые данные для выполнения команды движения: информацию о координатах и ориентации робота в начальном и конечном положении, данные о карте местности (при её наличии) и т.д. В свою очередь МСУ получает фактические данные о ходе выполнения команды по цепи обратной связи МД.

Тактический уровень решает задачи планирования пути и следования по траектории. В данной работе для реализации тактического уровня управления используется алгоритм, описанный в работе [11]. Аналогичный подход применяется для управления мобильным роботом в [12]. На основе данных работ была построена математическая модель СУ тактического уровня при помощи ПО Simulink (MATLAB) для вычисления угловых скоростей колёс МД с целью его прохождения по заданной траектории.

Исполнительный уровень СУ построен на базе системы контуров подчинённого регулирования: подсистемы регулирования тока и подсистемы регулирования скорости. На вход регулятора скорости поступает рассогласование между желаемой скоростью и фактической скоростью колеса (получаемой с датчика). На рис. 4 представлена структурная схема СУ исполнительного уровня для одного привода (правого). Для второго привода СУ построена аналогично.

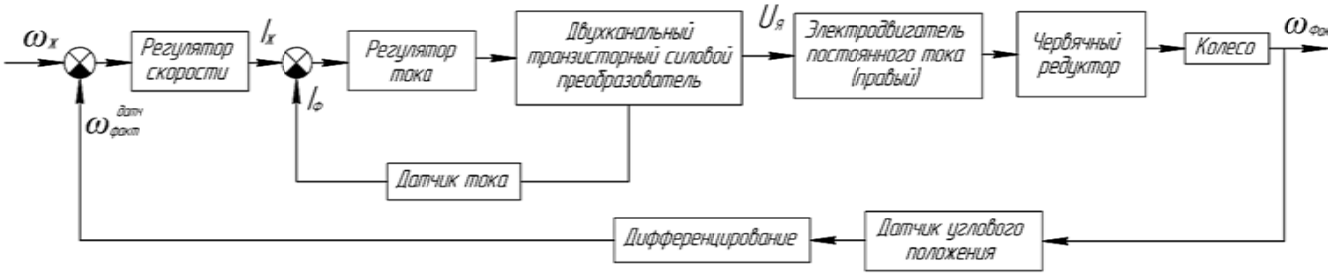


Рисунок 4 – Структурная схема СУ исполнительного уровня для одного привода

Было проведено исследование математической модели СУ МД. Мобильный робот должен проехать по заданной траектории с наименьшим отклонением от неё. Стоит отметить, что исследование проводилось без регулятора тока, использовался только ПИ-регулятор скорости. Результаты модельного эксперимента приведены на рис. 5:

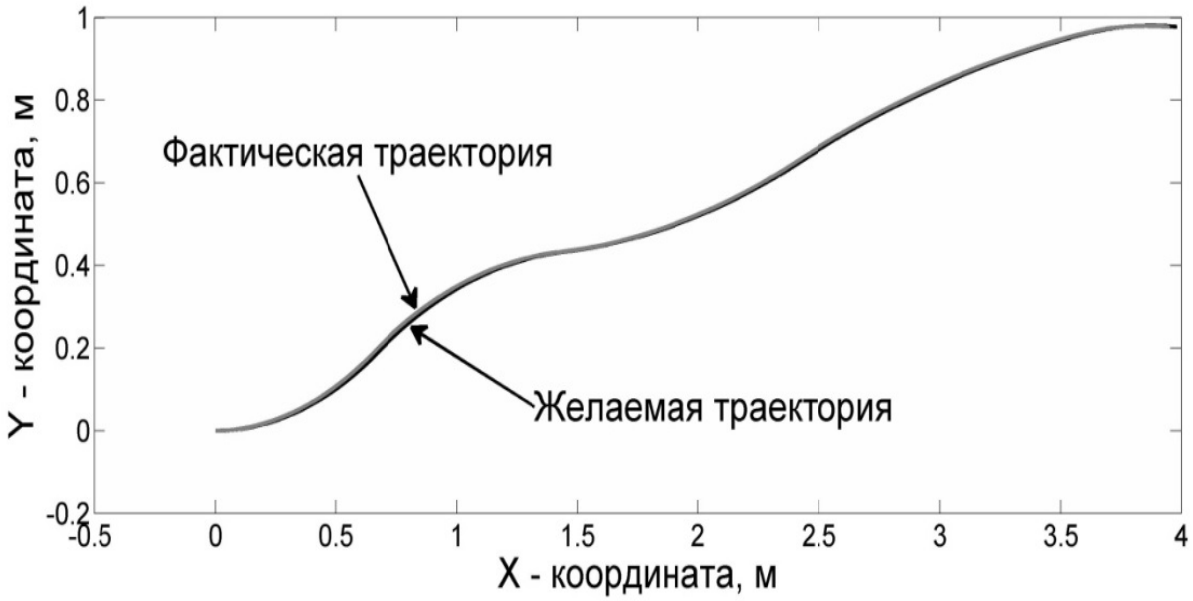


Рисунок 5 – Желаемая и фактическая траектория движения моделимодульного МР

Из графика видно, что отклонение фактического движения от желаемого достаточно невелико (до 35 мм) даже без регулятора тока.

На рис. 6 представлен изометрический разрез конструкции МД.

Рассмотрим некоторые особенности конструкции МД. Устройство состоит из отдельных частей, позволяющих относительно легко осуществлять сборку модуля (рис. 6). Конструкция МД содержит в себе два блока, соединяющихся с приводами, и электронную управляющую часть. Привод МД представляет собой электродвигатель (1) и червячный редуктор (2). Шестерня (3) на выходе редуктора соединяется с валом (4) посредством многослойной муфты (5). Вал, муфта, каркасный узел (6), многослойная втулка подшипника (7), колесо (8) и энкодер (9) являются единым блоком – *модуль-колесо (*рис. 7). Электронная управляющая часть включает в себя аппаратно-программную платформу (10) на микроконтроллере и транзисторный силовой преобразователь (11).

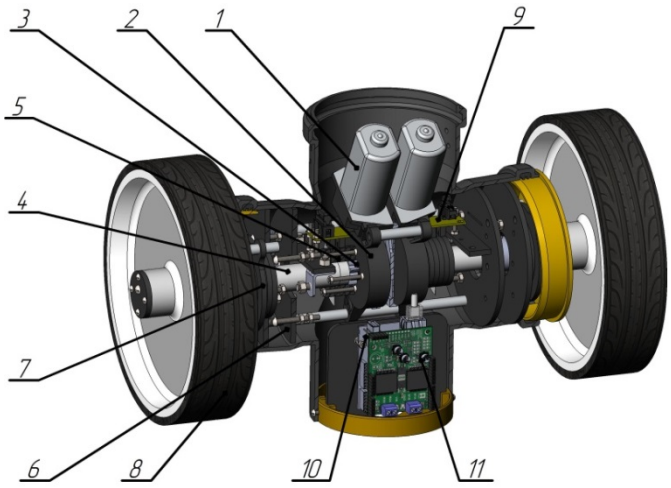


Рисунок 6 – Модуль движения

Рисунок 7 – Модуль-колесо

Заключение

Сформулированы основные положения концепции модульного гетерогенного мобильного робота. Разработана и изготовлена конструкция модуля движения. Создан первый, достаточно простой вариант математической модели системы управления МД (от простого к сложному). Проведённое исследование математической модели СУ показало её адекватность и работоспособность. Была изготовлена конструкция батарейного модуля, который является самостоятельным электронным устройством с вычислительной системой (подробно не рассматривается).

Работа выполняется при частичной поддержке РФФИ: грант 16-07-00811а.

1. Fukuda T. A dynamically reconfigurable robotic system (concept of a system and optimal configurations) / T. Fukuda and S. Nakagawa // In Proceedings of IECON ’87: 1987 International Conference on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation, 1987.
2. M-TRAN: selfreconfigurable modular robotic system / S. Murata, E. Yoshida, A. Kamimura, H. Kurokawa, K. Tomita, and S. Kokaji // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 7(4):432–441, 2002.
3. Design of the ATRON lattice-based self-reconfigurable robot / E.H. Østergaard, K. Kassow, R. Beck, and H.H. Lund.// Autonomous Robots, 21(2):165–183, 2006.
4. Salemi B. SUPERBOT: A deployable, multi-functional, and modular self-reconfigurable robotic system / B. Salemi, M. Moll, and W.-M. Shen // In Proceedings, IEEE/RSJ Intl. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pages 3636–3641, Beijing, China, 2006.
5. On sub-modularization and morphological heterogeneity in modular robotics / A.H. Lyder, K. Stoy, R.-F. Mendoza-Garcia, J.C. Larsen, and P. Hermansen // Intelligent Autonomous Systems 12, volume 193 of Advances in Intelligent Systems and Computing, pp. 649-661. Springer Berlin Heidelberg, 2013.
6. Baca J. A heterogeneous modular robotic design for fast response to a diversity of tasks / J. Baca, M. Ferre, and R. Aracil // Robotics and Autonomous Systems, vol. 60, no. 4, pp. 522–531, 2012.
7. Андреев В.П. Функционально-модульный принцип построения гетерогенных мобильных роботов / Андреев В.П., Подураев Ю.В. // Экстремальная робототехника. Труды международной научно-технической конференции. – Санкт-Петербург, 2016. (настоящий сборник).
8. Андреев В.П. Групповое управление мобильных роботов на основе сетевых технологий / Андреев В.П., Пряничников В.Е., Прысев Е.А. // Средства робототехники для обеспечения безопасности. Планетоходы, космическая робототехника и наземные роверы: Труды международной конференции. – СПб.: Изд-во «Политехника-сервис», 2010. – С.279 – 283.
9. Андреев В.П. Разработка технологии межмодульного общения в гетерогенном модульном мобильном роботе / Андреев В.П., Плетенев П.Ф. // Экстремальная робототехника. Труды международной научно-технической конференции. – Санкт-Петербург, 2016. (настоящий сборник).
10. Андреев В.П. Территориально-распределённое многооператорное управление роботизированными системами с использованием сетевых технологий / Андреев В.П., Кирсанов К.Б., Подураев Ю.В. // Экстремальная робототехника. Труды международной научно-технической конференции. – Санкт-Петербург: Изд-во «Политехника-сервис», 2015. – С.71 – 76.
11. Gulati S. High performance control for graceful motion of an intelligent wheelchair / Gulati S., Kuipers B. // Proc. 2008 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA, May 2008), pp. 3932–3938.

12. Давыдов О.И. Алгоритм управления дифференциальным приводом мобильного робота РБ-2 / Давыдов О.И., Платонов А.К. // Препринт ИПМ им. М.В.Келдыша РАН. Москва. 2015. № 25. - С.4 - 16.

E.A. Devyaterikov, B.B. Mikhailov

USING OF VISUAL ODOMETER DATA FOR AUTOMATIC MOBILE ROBOT RETURN. RESULTS OF EXPERIMENTAL RESEARCH

BMSTU Scientific –Educational Center «Robotic Engineering», Moscow
retegor@mail.ru, robot@bmstu.ru

Abstract

The paper presents mobile robot control system for automatic returning that uses fusion of visual odometry and other autonomous navigation sensors, results of its experimental research. 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 is capable of working in unprepared nondeterministic environment and wheels slippage insensitive. Proposed sensor fusion approach for visual odometry and other autonomous sensors allows to implement mutual compensation of their inaccuracies under difficult conditions.

Keywords: mobile robot, path recovering, visual odometry, autonomous return, sensor fusion.

Introduction

The radio-controlled mobile robots are widely used when working on hazardous territory discovering. The problem arises when connection is lost, when visibility is cramped and in other cases when there is no possibilities to continue manual control. It obstructs fast escaping of robot from unfavorable environment and results damaging or loss of expensive equipment. The systems of autonomous returning to operator are applied in such cases and the following sensors are widely used in them for robot position estimation: encoders, inertial systems, GPS, rangefinders, beacons, the systems of simultaneous localization and mapping (SLAM). But these approaches are imperfect. The wheel odomerty loses accuracy in case of wheel slippage. Inertial systems require continuous addition that results error accumulation. GPS has low local scale accuracy near massive constructions and indoor. The beacons require setting up that could be unacceptable in extreme conditions. Laser rangefinder is expensive and requires objects in field of view and complicated algorithms to track them. SLAM systems require static objects in environment but any object appearance may be affected ever after robot walked around it last time. So under extreme conditions when there are no absolute reference points, beacons or other static landmarks traditionally used sensors do not always provide accurate mobile robot localization on the last part of its trajectory for automatic return.

The alternative approach is visual odometry - dead reckoning autonomous self path recovering based on computer vision. Visual odometry does not have disadvantages listed above and in some cases could compensate associated inaccuracies so it is important to solve automatic returning task fusing visual odometry and other traditional sensors of autonomous navigation. 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 its accuracy, performance and working ability inside robot control system. The robot returning algorithm was developed in [4]. We proposed sensor fusion approach for visual odometer [5] that features accuracy estimation for each data comes from visual odometer in each frame to fuse it with data of other autonomous navigation sensors. This paper presents the results of experimental research of proposed autonomous returning system.

Fusion of visual odometer and other sensors of autonomousnavigation

Absolute navigation sensors do not always provide enough accurate robot positioning in local navigation tasks [6, 7] while in case of connection loss it is generally required to implement fast and accurate return along last meters of trajectory. E.g. connection could be lost when robot moves along the wall where GPS accuracy usually is affected. SLAM system [8] allows to drop accumulated errors through static objects recognition on built map but there could be no such objects outdoor just on last trajectory region where SLAM due to its algorithm specifics temporary cannot provide enough accuracy [9].

Autonomous navigation approaches such as wheel odometry or inertial sensors allows to estimate current robot position by dead reckoning. They are less demanding on environment conditions and are widely used for local navigation. But even in case of over constrained sensor fusion implementations the accumulated error becomes too high under extreme conditions such as wheel slippage [10]. The alternative approach is visual odometry. It also accumulates the error but is deprived of many considered deficiencies and generally is less demanding on image quality than SLAM [9]. So fusion of visual odometry and other autonomous navigation sensors is used in this paper. The trivial way to combine data x_i of some sensors is to use its weighted average considering their variances σ_i^2 [11]:

$$y = \frac{(\sigma_1^{-2}x_1+\sigma_2^{-2}x_2+\cdots+\sigma_n^{-2}x_n)}{\sigma_1^{-2}+\sigma_2^{-2}+\cdots+\sigma_n^{-2}} = \frac{\sum_{i=1}^{n}\sigma_i^{-2}x_i}{\sum_{i=1}^{n}\sigma_i^{-2}}, \quad (1)$$

However the accuracy of visual odometer rapidly changes from frame to frame during movement, the measurements contain non-stationary noise. So unlike other sensors its variance cannot be measured in advance. In [5] we proposed to estimate accuracy of each piece of data come from visual odometer in each frame analyzing inaccuracies arised on main stages of its algorithm. Its variance in (1) is estimated as:

$$\sigma_{VO}^2 = \sigma_{VO_0}^2 k_\chi k_Z k_\omega k_n,$$

where $\sigma_{VO_0}^2$ – base variance, $k_\chi, k_Z, k_\omega, k_n$ – multipliers that consider the factors that mainly affect visual odometer accuracy: conditioning, feature point distances, angular speed and number of feature points.

Automatic return system

The proposed sensor fusion approach was used in mobile robot automatic return system (Fig. 1) that relies on data of visual odometer (*VO*), inertial gyroscope (*G*), wheel odometry associated with drives (*D*) and control signals (*v*, w**).

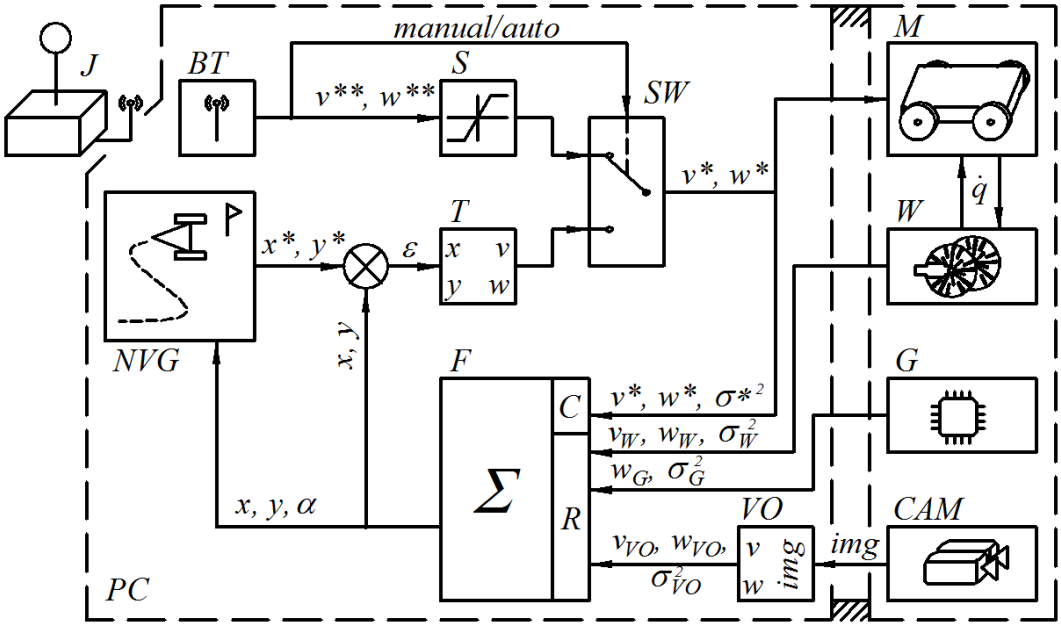


Figure 1 – Automatic return system with sensor fusion

In manual mode machine operator controls robot movement with using of joystick *J*. Readings of the sensors are fused in fusion module *F* and the trajectory is saved with according to them. When connection is broken the system is switched into automatic mode and robot moves back autonomously. In this case data of the same sensors and fusion algorithm are used to estimate current robot position.

Experimental research

The system was set up on four-wheeled mobile robot designed in BMSTU Scientific–Educational Center "Robotic Engineering". Additionally the specially designed synchronous stereo camera, inertial angular velocity sensor and computer for communication and proposed software performing were set up onboard.

The experiments were carried out in 2 stages. On 1st stage operator guided the robot by joystick from start point A_1 to end point B_1 through arbitrary trajectory, e.g. S-shaped one that shown on Fig. 2. At that time the trajectory was approximated and saved with using of algorithm proposed in [4]. When robot reached end point the connection lost was simulated and robot was switched into return mode. On the 2nd stage the robot

moved back to point A_1 along saved path. The mean square error of getting to start point relatively to trajectory length was the main rated value.

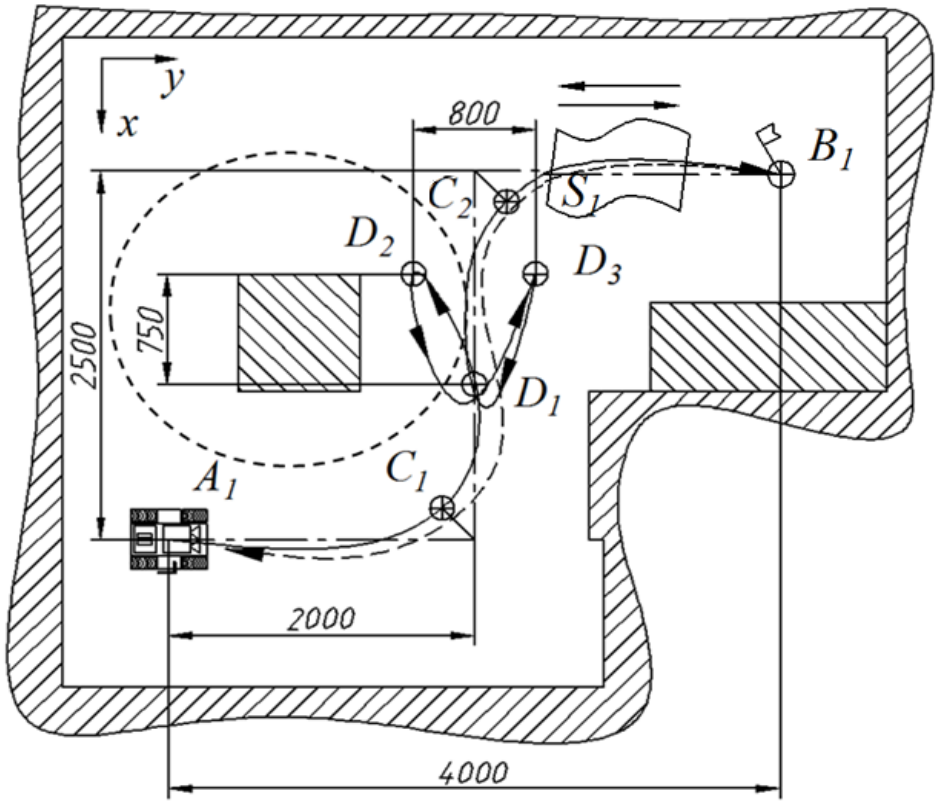


Figure 2 – S-shaped indoor trajectory

In each run the data of each sensor was stored independently and simultaneously. It was the data of visual odometer VO, inertial gyroscope G, wheel odometry W and control signals C. Different fusion combinations of these sensors were also stored to research the system accuracy and possibilities. The best results was shown by: (VO+G+C), (W+G) and (VO+G+W).

Totally about 80 runs were carried out under different conditions indoor and outdoor. Main system parameters like accuracy, invariance to environment changes, wheel slippage insensitiveness and trajectory loops removal were tested indoor. Indoor runs along "S", "L", "U" shaped and other trajectories length of up to 15,5 m and total turn angle of up to 180° showed that the proposed system is capable of implementing automatic mobile robot return accurately enough. E.g. in runs along the trajectory shown on Fig. 2 the mean sq. error of return with using of visual odometer (VO), gyroscope (G) and control signals (C) was about 4,2%. Wheel odometry (W) combining gyroscope (G) measured robot position more accurate – with 3,1% error. Despite the fact that visual odometer itself made 13,4% of error the fusion of all sensors (VO+G+W) provided practically the same accuracy 3,2..3.5% (depending on how gyroscope data is used). It confirmed effectiveness of proposed sensor fusion approach.

The runs with complete environment change were carried out. The robot walked and wrote its path in one room but returned in other one capturing completely another scene. Thus the invariance to environment changes was confirmed.

Also runs along trajectories containing probing moves and large loops like door (D_1D_2) entering with several attempts or moving around the column were carried out. Robot did not repeat these movements. It confirmed effectiveness of trajectory description algorithm [4].

Runs with wheel slippage simulation were carried out. Polyethylene film was put on the floor, e.g. at S_1 point, and it was held or moved together with robot. These experiments confirmed that control system with visual odometer is wheel slippage insensitive.

Outdoor experiments were focused on return accuracy estimation when robot was moving on different surfaces (asphalt, leaves, soil, grass, and other) under different light conditions. E.g. runs along Y-shaped trajectory (Fig. 3) in urban scene (asphalt, buildings, vehicles) length of 25,5 m with loop and environment changes; runs on grass and slippage soil with trees length of 16 m and other scenes were carried out. Runs under visual odometry unfavorable conditions were carried out e.g. at dusk or on smooth surfaces. Proposed fusion algorithm allowed to avoid accuracy decreasing in such cases.

According to the results of all runs the radiuses of return regions were estimated for 3 sensor combinations under associated favorable and unfavorable conditions with probabilities of 90.0% and 95.5% (2 standard deviations (SD)). Table 1 shows the results.

Table 1. Experiment summary

Sensors combination	Desig-nation	Number of runs	SD	Radius of return region	
				p=90,0%	*p=95,5%*
VO+G+C:					
- high visibility	4	47	3,7%	6,1%	7,4%
- all conditions	5	60	4,1%	6,7%	8,2%
G+W:					
- no wheel slippage	1	26	2,8%	4,6%	5,6%
- all conditions	6	60	5,0%	8,2%	10,0%
VO+G+W:					
- favorable conditions	2	23	3,1%	5,1%	6,2%
- all conditions	3	30	3,4%	5,6%	6,8%

Fig. 4 shows the areas as circles on the example of trajectory on soil and grass length of 15,5 m in one direction.

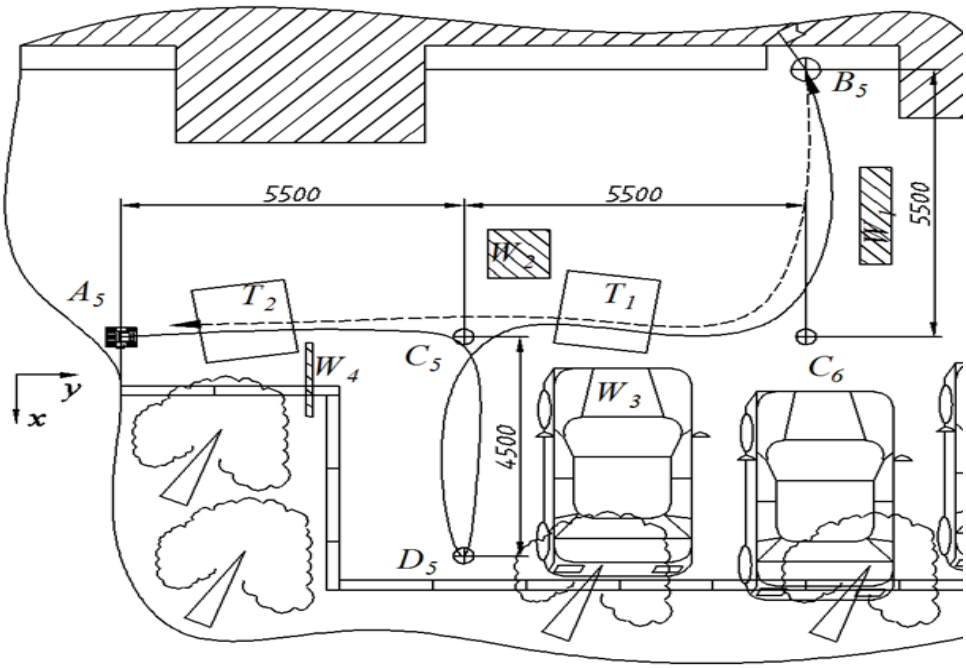


Figure 3 – Y-shaped outdoor trajectory

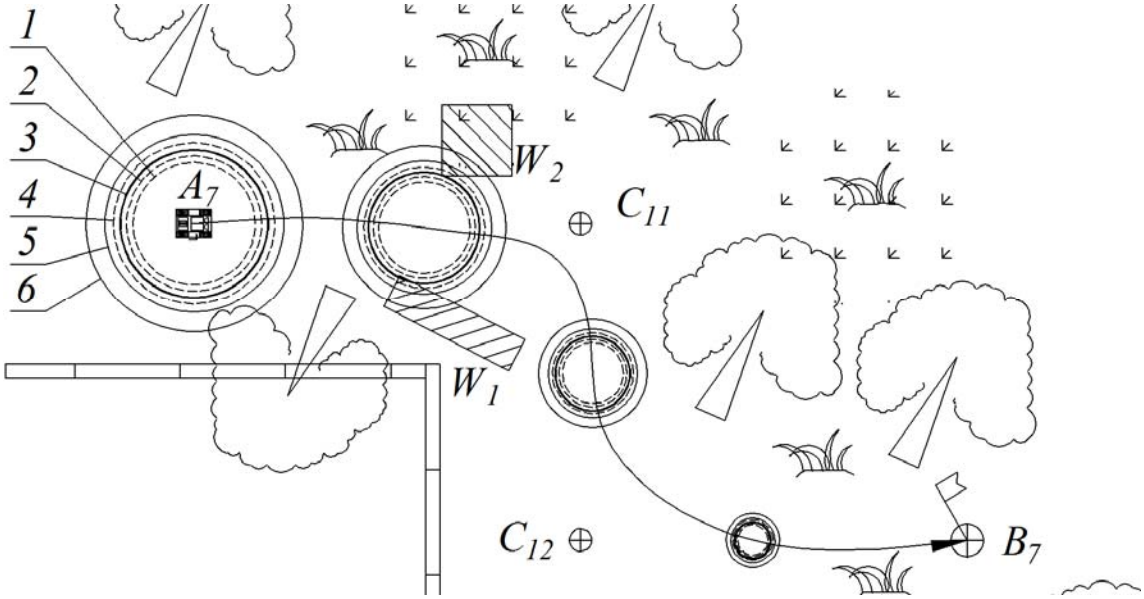


Figure 4 – Return regions with probability of 95,5% (1..6 – refer to Table 1)

Regions corresponding to good conditions are drawn by a dotted lines. Fig. 4 and table 1 show that the least area 5,6% is obtained by wheel odometry on smooth surface without slippage but this result becomes unpredictable when wheel slippage is appeared. Fusion of all sensors provides the most stable result 6,2..6,8% under different conditions. Proposed fusion algorithm allows to increase return accuracy under difficult conditions by means of mutual compensation of measuring errors that occur in different sensors.

Conclusion

During the work the mobile robot automatic return system that uses fusion of visual odometer and other autonomous navigation sensors proposed in [5] and based on accuracy estimation of each visual odometry piece of data was implemented. The system was set up on four-wheeled mobile robot and experimentally researched with using of different combinations of visual and wheel odometry, gyroscope and control signals data.

Experiments confirmed that the system is capable to perform mobile robot automatic return in nondeterministic environment accurately enough: with error that is less than 6,8% of trajectory length with up to 180° of total turn angle in 95,5% of runs under considered conditions. The robot does not repeat small probing moves and trajectory loops. Proposed system is invariant to environment changes, insensitive to wheel slippage and allows to increase navigation accuracy under difficult conditions by means of mutual compensation of measuring errors that occur in different sensors.

Experiments confirmed that integrating of developed machine vision system into mobile robots control systems increases accuracy of current position estimation and significantly extends their functionality.

1. Xu J., Shen M., Wang W., Yang L., Liu J., Kalyaev I., «Robust stereo visual odometry for autonomous rover», 6th WSEAS International Conference on Signal, Speech and Image Processing. 2006.
2. Nist´er D., Naroditsky O., Bergen J., «Visual odometry for ground vehicle applications». Journal of Field Robotics, Volume 23(1). 2006. Pp. 3-20.
3. Scaramuzza D., Fraundorfer F., Visual Odometry [Tutorial], Robotics & Automation Magazine, Vol 18, Issue: 4. 2011. Pp. 80 – 92.
4. Devyaterikov E. A., Mikhailov B. B. Algorithm of mobile robot automatic return with using of visual odometry data. “Extreme robotics 2014”. Pp. 316-320.
5. Devyaterikov E. A., Mikhailov B. B. Using of visual odometer data for automatic mobile robot return in environments without fixed landmarks. “Extreme robotics 2015”. Pp. 351-355.
6. Santos F. M. A robust self-localization system for a small mobile autonomous robot. Int. Symp on Robotics and Automation 2002 — ISRA 2002. 2002. P. 1-6.
7. Antoni D., Ban Z., Zagar M. Demining Robots – Requirements and Constraints. ATKAAF 42(3−4). 2001. Pp. 189−197.
8. Nguyen V. A., A. Harati, R. Siegwart. Lightweight SLAM algorithm using Orthogonal planes for indoor mobile robotics. Intelligent Robots and Systems. 2007. P. 658-663.
9. Williams B. P., Reid I. D.. On combining visual SLAM and visual odometry. ICRA, 2010. P. 3494-3500.

10. Ojeda L., Borenstein J. Reduction of Odometry Errors in Over-constrained Mobile Robots. SPIE 5083, Unmanned Ground Vehicle Technology V, (30 September 2003). 2003.
11. Salina B., Malathi P., Arokia Priya R. An Efficient Sensor Fusion Technique for Obstacle Detection. International Journal of Advance Research in Engineering, Science & Technology. 2014.

Е.А. Девятериков, Б.Б. Михайлов

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ ВИЗУАЛЬНОГО ОДОМЕТРА ДЛЯ АВТОНОМНОГО ВОЗВРАЩЕНИЯ МОБИЛЬНОГО РОБОТА. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Научно-учебный центр «Робототехника» МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва
retegor@mail.ru, robot@bmstu.ru

Аннотация

В работе представлена система автоматического возвращения мобильного робота с использованием объединенных данных визуального одометра и других датчиков автономной навигации, а также результаты ее экспериментального исследования. 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. Комплексирование данных визуального одометра и других датчиков автономной навигации по предложенному алгоритму позволяет взаимно компенсировать их погрешности измерения в неблагоприятных условиях.

Ключевые слова: мобильный робот, траектория движения, визуальная одометрия, автоматическое возвращение, комплексирование данных.

Введение

При выполнении разведывательных работ на опасных для человека участках используются дистанционно управляемые мобильные роботы. Проблема возникает при потере связи, ухудшении видимости и других случаях, когда не может использоваться ручное управление, что затрудняет оперативный вывод робота из неблагоприятных условий, и как результат - повреждение или потеря дорогостоящего оборудования. В таких случаях применяются системы автоматического возвращения робота к оператору, в которых для измерения текущих координа широко используются: энкодеры, инерциальные системы, GPS, дальномеры, маяки, системы одновременной локализации и картографирования (SLAM). Однако их применение имеет свои недостатки: точность колесной одометрии снижается при проскальзывании колес. Инерциальная система требует интегрирования, что ведет накоплению ошибки. GPS имеет низкую локальную точность при движении рядом с массивными сооружениями и в помещении. Маяки требуют предварительной установки, что не всегда приемлемо в экстремальной ситуации. Лазерный дальномер дорогой; ему нужны объекты в зоне видимости и сложный алгоритм привязки к ним. SLAM системы требуют наличия стационарных объектов, внешний вид которых может измениться при возвращении. В условиях недетерминированной среды, когда нет точек отсчета, реперов, стационарных маяков, перечисленные средства автономной навигации не всегда позволяют достаточно точно измерять текущие координаты робота на последнем участке траектории для его автоматического возвращения.

Альтернативой этим методам является визуальная одометрия - автономная оценка собственного перемещения робота по изображениям бортовых телекамер путём счисления координат. Визуальная одометрия не имеет этих недостатков и в отдельных случаях может компенсировать погрешности измерения перечисленных датчиков, поэтому целесообразно решение задачи автономного возвращения с применением визуальной одометрии совместно с традиционными датчиками.

Визуальный одометр [1, 2, 3] основан на измерении смещения ключевых точек в пространстве, информация о которых получается из анализа последовательности стереоизображений системы технического зрения. Это средство относительной навигации, не требующее наличия стационарных точек отсчета. В ходе предыдущей работы он был реализован, определены его характеристики и проверена работоспособность в системе управления робота, спроектирован алгоритм возвращения [4]. В [5] предложен способ комплексирования показаний визуального одометра и других датчиков автономной навигации, основанный на оценке точности его показаний. В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований предложенной системы возвращения.

Комплексирование показаний визуального одометра и других автономных датчиков

Абсолютные навигационные датчики не всегда обеспечивают точное измерение координат для задач локальной навигации [6, 7], в то время как при потере дистанционного управления, как правило, требуется точно осуществить возвращение на последних нескольких метрах траектории. Связь может быть потеряна, например, при движении робота вдоль массивных металлоконструкций, где снижается частота и точность данных GPS. SLAM система [8] позволяет сбросить накопленную ошибку за счет периодической привязки к построенной карте, но в момент потери управления робот может находиться на открытой местности без стационарных объектов, где SLAM в силу специфики алгоритмов временно не обеспечивает достаточную точность [9].

Средства автономной навигации, такие как колесная одометрия и инерциальные датчики, позволяют оценить положение робота путем счисления координат. Они менее требовательны к окружающей среде и широко используются для локальной навигации, но даже при комплексировании нескольких датчиков накапливается существенная ошибка измерения координат в неблагоприятных условиях, например, при проскальзывании колес [10]. Альтернативой этим методам является визуальная одометрия. Она накапливает ошибку, но не имеет многие недостатки рассмотренных датчиков и в целом менее требовательна к качеству изображений, чем SLAM [9]. Поэтому в данной работе для автоматического возвращения используются объединенные данные визуальной одометрии и других датчиков автономной навигации. Тривиальным способом объединения показаний нескольких датчиков x_i является использование их среднего взвешенного с учетом их дисперсий σ_i^2 [11]:

$$y = \frac{(\sigma_1^{-2}x_1+\sigma_2^{-2}x_2+\cdots+\sigma_n^{-2}x_n)}{\sigma_1^{-2}+\sigma_2^{-2}+\cdots+\sigma_n^{-2}} = \frac{\sum_{i=1}^{n}\sigma_i^{-2}x_i}{\sum_{i=1}^{n}\sigma_i^{-2}}, \quad (1)$$

Однако точность показаний визуального одометра существенно изменяется от кадра к кадру во время движения, результаты его измерений содержат нестационарный шум. Поэтому, в отличие от других датчиков его дисперсия не может быть определена заранее. В [5] была предложена оценка точности каждого показания визуального одометра по анализу ошибок, возникающих на нескольких этапах его работы. Его дисперсия в формуле (1) оценивается в виде:

$$\sigma_{VO}^2 = \sigma_{VO_0}^2 k_\chi k_Z k_\omega k_n,$$

где $\sigma_{VO_0}^2$ – базовая дисперсия, $k_\chi, k_Z, k_\omega, k_n$ – коэффициенты, учитывающие факторы, наиболее влияющие на его точность: обусловленность решаемой СЛАУ; расстояние до особых точек; угловую скорость; количество особых точек.

Система автоматического возвращения

Предложенный способ комплексирования был использован в системе автоматического возвращения мобильного робота (рис. 1) по данным визуального одометра (*VO*) , инерциального датчика (*G*), колесной одометрии по энкодерам приводов (*D*) и сигналам управления (*v*, w**).

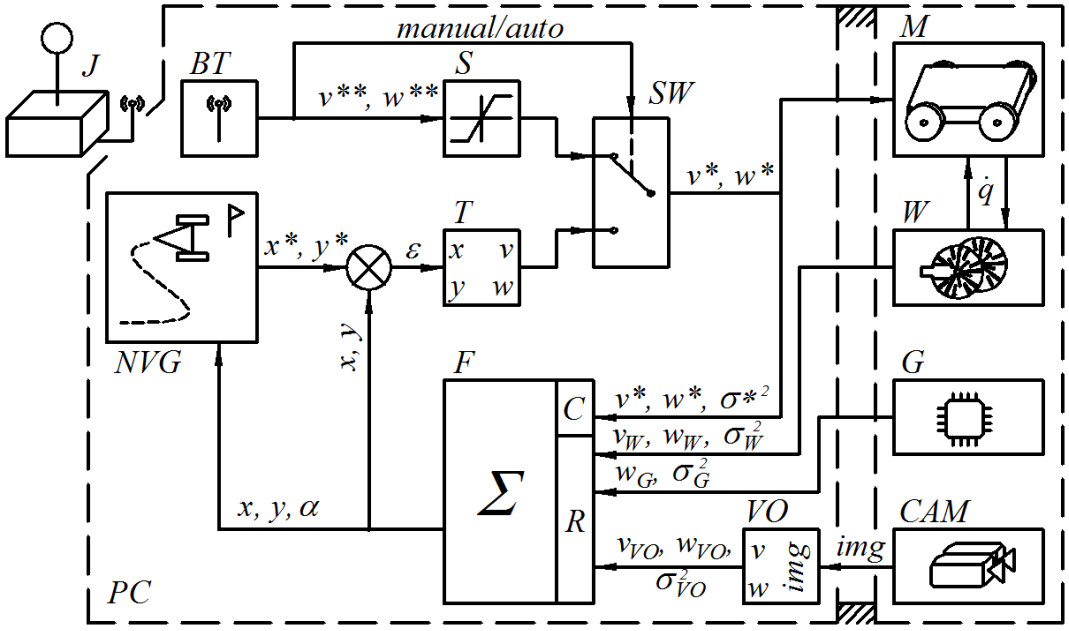


Рисунок 1 – Система автоматического возвращения с объединением датчиков

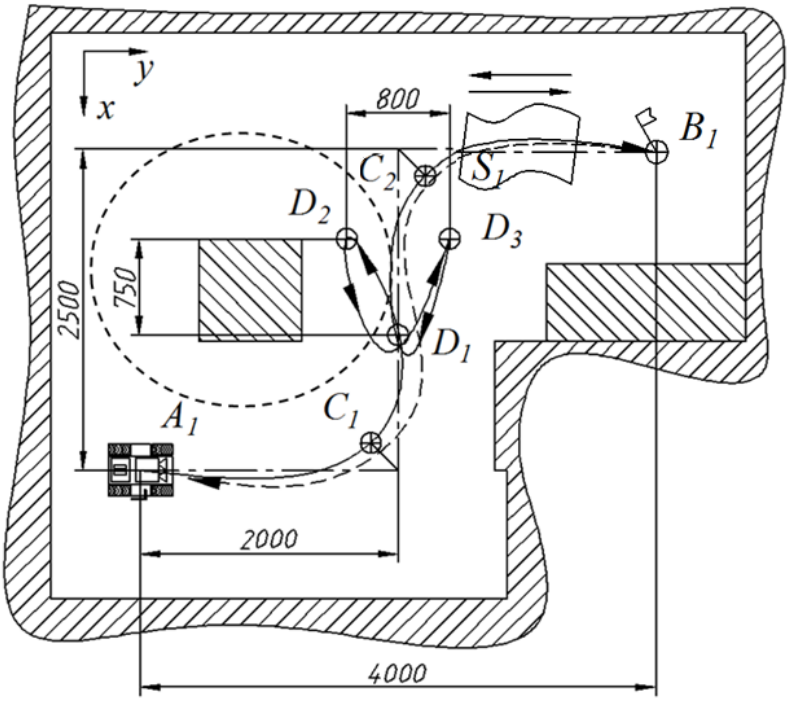


Рисунок 2 – S-образная траектория в помещении

В ручном режиме оператор управлял движением робота, используя джойстик *J*. Данные датчиков объединялись в блоке комплексирования *F,* и по ним строилась траектория робота. При потере связи система переключалась в режим возвращения, и робот автоматически двигался по сохраненной траектории в исходную точку (к оператору). При этом для измерения текущих координат робота использовались данные тех же датчиков и тот же алгоритм комплексирования *F*.

Экспериментальные исследования

Система была установлена на четырехколесный мобильный робот, разработанный в НУЦ «Робототехника» МГТУ им. Н. Э. Баумана. На робот были дополнительно установлены: специально изготовленная синхронизированная стереокамера, измеритель угловой скорости и компьютер для выполнения разработанного программного обеспечения и связи с оператором.

Эксперименты проводились в 2 этапа. На 1-м этапе оператор с помощью джойстика вел робот из начальной точки A_1 в конечную точку B_1 по произвольной траектории, например S-образной, которая показана на рис. 2. При этом по предложенному в [4] алгоритму строилась траектория движения робота. Когда он достигал конечной точки, имитировалась потеря связи, и оператор переключал его в режим возврата. На 2-м этапе робот двигался назад в точку A_1 по сохраненному описанию траектории. Оценивалась средняя квадратичная погрешность выхода робота в исходную точку относительно длины траектории.

В каждом эксперименте одновременно регистрировались показания визуальной одометрии VO, инерциального гироскопа G, колесной одометрии W и сигналов управления C. Для определения точности предложенной системы были исследованы различные сочетания этих датчиков при комплексировании. Наиболее точные результаты показали варианты: (VO+G+C), (W+G) и (VO+G+W).

Выполнены заезды с полным изменением наблюдаемой сцены. Для этого робот записывал траектории в одном помещении, а возвращался по ней в другом, наблюдая совершенно другую сцену. Так была подтверждена инвариантность предложенной системы к изменениям в среде.

Было выполнено движение по траекториям, содержащим мелкие поисковые движения и крупные замкнутые участки, например, въезд в дверь (D_1D_2)с нескольких попыток или объезд колонны. При возвращении робот не повторял их, что подтвердило работоспособность предложенного алгоритма описания траектории [4].

Всего выполнено более 80-ти заездов в помещении и на улице в различных условиях движения. В помещении проверялись основные параметры системы: точность, инвариантность к изменениям среды и проскальзыванию колес, исключение замкнутых участков траектории. Заезды в помещении по «S», «L» и «U» образным и другим траекториям длиной до 15,5 м и углом поворота до 180° показали, что предложенная система позволяет выполнить автоматическое возвращение достаточно точно. Например, в заездах по траектории, показанной на рис. 2, ср. кв. погрешность измерения координат по данным визуального одометра (VO), гироскопа (G) и сигналам управления (C) составила 4,2%. Колесная одометрия (W) в сочетании с гироскопом (G) измеряла координаты несколько точнее, с ошибкой 3,1%. Несмотря на то, что сам визуальный одометр показал высокую ошибку 13,4%, объединение показаний всех датчиков (VO+G+W) позволило практически сохранить общую точность (3,2..3,5% в зависимости от способа использования гироскопа) что подтвердило эффективность алгоритма комплексирования данных.

Были выполнены заезды с имитацией проскальзывания колес. Для этого на подстилающей поверхности укладывалась полиэтиленовая пленка, например в точке S_1, которая удерживалась или

смещалась вместе с роботом. Эти эксперименты подтвердили, что система с визуальным одометром к нему нечувствительна.

На улице оценивалась точность выхода робота в исходную точку на различных подстилающих поверхностях (асфальт, листья, грунт, трава и другие) при изменяющейся освещенности. Например, были выполнены заезды по Y-образной траектории (рис. 3) в урбанистической сцене (асфальт, здания, автомобили) длиной 25,5 м с замкнутым участком и изменениями в среде; заезды по траве и скользкому грунту с деревьями и кустарниками на расстояния до 16 м и других сценах, например, на детской площадке. Выполнены заезды в неблагоприятных для визуальной одометрии условиях: в сумерках и темноте, на однотонных подстилающих поверхностях. Предложенный алгоритм комплексирования позволил избежать снижения точности возвращения и в этом случае.

По результатам всех заездов был оценен радиус области возвращения для 3-х комбинаций датчиков в благоприятных и неблагоприятных для них условиях с вероятностью попадания 90,0% и 95,5% (2 СКО). Результаты показаны в таблице 1.

Таблица 1. Сводная таблица результатов экспериментов

Комбинация датчиков	Обозначение	Кол-во заездов	СКО	Радиус области возвращ.	
				p=90,0%	*p=95,5%*
VO+G+C:					
- хорошая видимость	4	47	3,7%	6,1%	7,4%
- все рассмотренные условия	5	60	4,1%	6,7%	8,2%
G+W:					
- без проскальзывания колес	1	26	2,8%	4,6%	5,6%
- все рассмотренные условия	6	60	5,0%	8,2%	10,0%
VO+G+W:					
- благоприятные условия	2	23	3,1%	5,1%	6,2%
- все рассмотренные условия	3	30	3,4%	5,6%	6,8%

Эти области изображены окружностями на рис. 4 на примере одной из траекторий длиной 15,5 м в

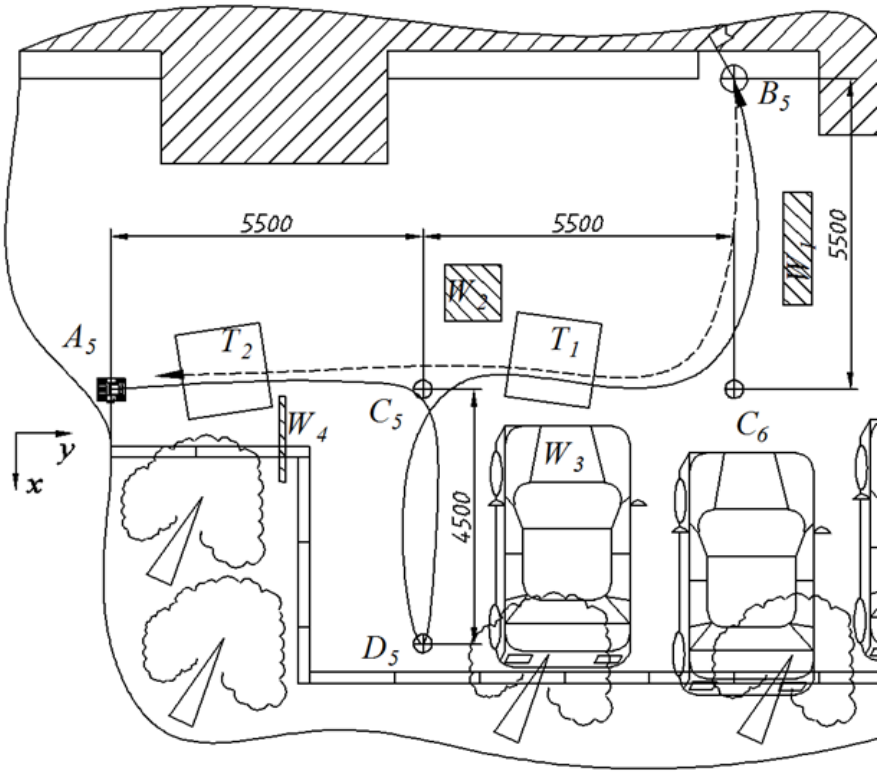


Figure 3 – Y-образная траектория

одну сторону.

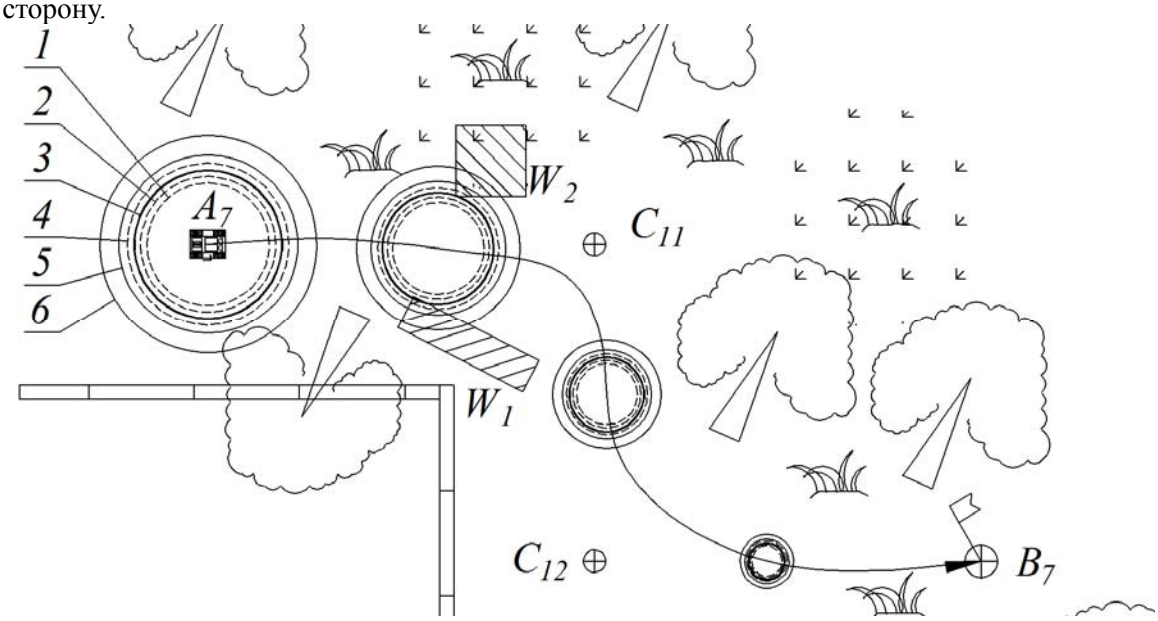


Рисунок 4 – Области возвращения робота с вероятностью 95,5% (1..6 – см. Таблицу 1)

Области возвращения для датчиков, работающих в благоприятных условиях, показаны пунктиром, во всех заездах – сплошными линиями. Как видно из рисунка и таблицы 1, наименьший радиус 5,6% области возвращения с вероятностью попадания 95,5% дает колесная одометрия при движении без проскальзывания колес, но результат непредсказуем при его появлении. Сочетание всех датчиков с визуальным одометром дало наиболее стабильный результат 6,2..6,8% в разных условиях движения. Предложенный алгоритм комплексирования позволил повысить точность возвращения робота в неблагоприятных условиях за счет взаимной компенсации ошибок измерения различных датчиков

Заключение

В ходе работы была реализована система автоматического возвращения по данным визуального одометра и других датчиков автономной навигации, объединяемым с помощью предложенного в [5] метода комплексирования, основанного на оценке точности каждого отдельного показания визуального одометра. Система была установлена на 4-х колесный мобильный робот и экспериментально исследована при использовании различных сочетаний источников информации: визуального одометра, гироскопа, колесной одометрии и сигналов управления.

Эксперимент показал, что система позволяет выполнить автоматическое робота в недетерминированной среде достаточно точно: с погрешностью менее 6,8% от длины траектории с суммарным углом поворота до 180° в 95,5% случаев в рассмотренных условиях. При этом робот не повторяет поисковые движения оператора и замкнутые участки траектории. Предложенная система инвариантна к изменениям в среде, не чувствительна к проскальзыванию колес и взаимно компенсирует недостатки различных датчиков в неблагоприятных для них условиях.

Проведенные эксперименты подтвердили, что интегрирование разработанной системы зрения в систему управления мобильных роботов повышает точность измерения текущих координат и существенно расширяет их функциональные возможности.

1. Xu J., Shen M., Wang W., Yang L., Liu J., Kalyaev I., «Robust stereo visual odometry for autonomous rover», 6th WSEAS International Conference on Signal, Speech and Image Processing. 2006.
2. Nist´er D., Naroditsky O., Bergen J., «Visual odometry for ground vehicle applications». Journal of Field Robotics, Volume 23(1). 2006. Pp. 3-20.
3. Scaramuzza D., Fraundorfer F., Visual Odometry [Tutorial], Robotics & Automation Magazine, Vol 18, Issue: 4. 2011. Pp. 80 – 92.
4. Девятериков Е. А., Михайлов Б. Б. Алгоритм описания траектории мобильного робота по данным визуального одометра для автоматического возвращения к оператору. Наука и образование МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. № 12. М.: 2014. С. 705-715.
5. Девятериков Е. А., Михайлов Б. Б., Использование данных визуального одометра для автономного возвращения мобильного робота в среде без фиксированных точек отсчета. Сб. трудов НТК «Экстремальная робототехника 2015». Спб.: ЦНИИ РТК, 2015. С. 351-355.

6. Santos F. M. A robust self-localization system for a small mobile autonomous robot. Int. Symp on Robotics and Automation 2002 — ISRA 2002. 2002. P. 1-6.
7. Antoni D., Ban Z., Zagar M. Demining Robots – Requirements and Constraints. ATKAAF 42(3−4). 2001. Pp. 189−197.
8. Nguyen V. A., A. Harati, R. Siegwart. Lightweight SLAM algorithm using Orthogonal planes for indoor mobile robotics. Intelligent Robots and Systems. 2007. P. 658-663.
9. Williams B. P., Reid I. D.. On combining visual SLAM and visual odometry. ICRA, 2010. P. 3494-3500.
10. Ojeda L., Borenstein J. Reduction of Odometry Errors in Over-constrained Mobile Robots. SPIE 5083, Unmanned Ground Vehicle Technology V, (30 September 2003). 2003.
11. Salina B., Malathi P., Arokia Priya R. An Efficient Sensor Fusion Technique for Obstacle Detection. International Journal of Advance Research in Engineering, Science & Technology. 2014.

C.N. Saypin[1], M.S. Saypina[2]

SELF-PROPELLED MULTIFUNCTIONAL CUPPING-GLASS MASSAGER BASED ON ACTIVE TRIANGULAR MODULE PARALLEL STRUCTURE

[1]Federal Budget-Funded Research Institute for Machine Science named after A.A. Blagonravov of the Russian Academy of Sciences (IMASH RAN)
S.Sayapin@rambler.ru
[2]Russian oncological Scientific Center of N.N. Blochin, Moscow
Maria.Sayapina@mail.ru

Abstract

In this paper, we propose the new concept of the self-propelled multifunctional cupping-glass massager based on the active triangle module parallel structure. The paper describes design principles and functional possibility this massager which will allow you to automate the process of sliding cupping massage.

Keywords:sliding cupping massage, self-propelled massager, flat parallel robot, modular robot.

Currently, there are numerous examples of effective using of cupping-glass massotherapy for treatment and prevention from development of lymphostasis after mastectomy, laparotomy, etc. cholecystectomy and other abdominal operations, and also conduct anti-cellulite treatments. The cupping-glass massage is included the combination influences on the patient body by the cupping-glasses and the massage. In addition this massage has also shown for treatment colds, bronchitis, pneumonia, myositis, lumbago, osteochondrosis of spine, mild form of the lumbar-sacral radiculitis, colitis etc [1]. In modern conditions the massage cupping-glasses are connected by vacuum hoses to the apparatus, ensured their degassing and other modes. The apparatus may be either portable or stationary, and the massage cupping-glasses can be mounted on the patient body fixedly, or with the possibility of making them sliding massage movements without their depressurization and separation from the body. In the first case the fixed cupping-glasses have influence only on the local places of the patient body. In this case the presence of a masseur is not required. As a result an efficiency of the massage by the fixed cupping-glasses versus the sliding cupping-glass massage is reduced or in some cases, for example in spinal osteochondrosis, etc., this procedure is generally not effective. In case of the sliding cupping-glasses massage the massager makes the massage personally. Therefore the presence of the masseur is required, but he can make the massage only with one patient by two the sliding cupping-glasses. As a result a daily productivity of the massager is limited. Therefore the massagers use all kinds of massage devices, for example, the Vacuum Therapy Machine for Massage Cupping Machine (model: MCWNV-600) (Fig. 1, a) [2]. In Fig. 1 (b) the basic massage movements for the sliding cupping-glasses massage are shown. These movements include following: I– straight II– zigzag, III - spiral, and IV – figure-of-eight.

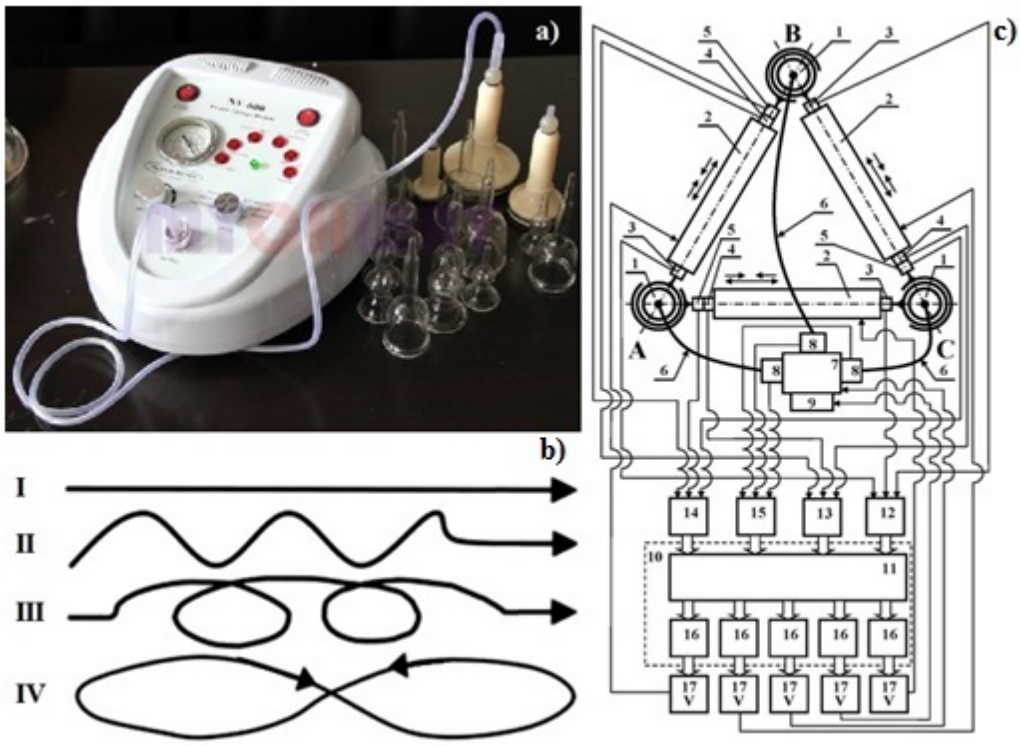


Figure 1 – The vacuum therapy machine for the sliding cupping-glass massage (a); the basic massage movements by the vacuum cupping-glass (b); the self-propelled cupping-glass massager (c)

Thus, the creation of a robot moving along the patient's body massage devices, being able to work autonomously without the presence of a massager, is an urgent task. In this paper, we propose the new concept of the self-propelled multifunctional cupping-glass massager based on the active triangle module parallel structure [3] and therefore it has higher a specific stiffness and a bearing capacity, and lower specific weight [4]. The proposed concept will allow be robotize the process of the sliding cupping-glasses massage. As a result there are the following advantages:

- the massager is able to organize autonomous conduction of cupping massage to several patients simultaneously, and holding cupping massage by several vacuum cupping-glasses in the sitting or standing, for example by three vacuum cupping-glasses on the breast and three vacuum cupping-glasses on the back of the patient at the same time and, as a result a daily productivity of the massager increases;
- there is the massage by sliding and stretching of muscle tissues at the same time the three vacuum cupping-glasses massage that improves the performance of the process of massage;
- there is the autonomous cupping self-massage to hard to reach areas of the body such as the back, and ensure the controlled movement of massage cups and massage banks bypass the moving parts of the body that are not valid for massage effects, such as moles, sensitive and damaged skin, post-operative wounds, etc.;
- the autonomous cupping massage does not require special facilities and can be performed at the bedside and in the home;
- the masseur released extra time, which can be used to conduct other types of massage and, as a consequence, there is a possibility of increasing the number of patients served per shift;
- there is the reduction of the physical fatigue of the massager, thereby increasing his productivity and improving health at the end of the work shift.

The self-propelled multifunctional cupping-glass massager (Fig. 1, c) has a massage device based on the active triangle module **ABC** with the parallel structure. The sides **AB**, **BC** and **CA** are made in the form of similar rods. The ends of rods are pivotally connected at the vertices of the active triangular module **ABC** with the vacuum massage cupping-glasses 1. Thus, each of the rods is provided a linear drive 2, a force sensor 3, a relative-displacement sensor 4, and a relative-velocity sensor 5. All vertices of triangle module **ABC** are executed with possibility of connection the like rods through them 2 for the formation of the additional active triangular parallel structures. The vacuum massage cupping-glasses 1 are pivotally connected at the vertices of the active triangular module **ABC** and form its device discrete fixation to the patient's body. In addition, each of the vacuum massage cupping-glasses 1 is hermetically connected by a flexible hose 6 to a mated canal of an air distributor 7 of a degassing system provided with a pressure sensor 8, the air distributor 7 and a vacuum pump 9 electrically connected with to a control system 10 in the form of a computer 11 with digital-to-

analogue converters (DAC), and relevant software. The inputs of the control system 10 are connected through the data buses of analog–digital converters (ADC) to the outputs: of ADC 12, 13, 14 and 15 of the force sensors 3 for ADC 12; the relative-displacement sensors 4 for ADC 13; the relative-velocity sensors 5 for ADC 14; and the pressure sensors 8 for ADC 15. The outputs of the control system 10 are connected through the output data buses to the corresponding inputs of software and the following units, connected in series: DAC 16, power amplifiers 17, linear drives 2, air distributor 7, and vacuum pump 9. The control system 10 made with the possibility of operational control and management in real-time.

The self-propelled multifunctional cupping-glass massager works as follows. On surface of the patient's body [1] an active triangle module **ABC** applied with vacuum massage cupping-glasses 1 in its vertices (Fig. 2, a, b). The initial position of the active triangle module **ABC** is mounted on the massaged area of the patient's body arbitrary. Then the vacuum massage cupping-glasses 1 degas by the vacuum pump 9 (Fig. 1) and after their individual suction and retraction of the skin on the value for reliable fixation of vacuum massage cupping-glasses 1 and excluding injury of the patient skin, which is determined visually, close the corresponding valve (in the figures not shown) of the air distributor 7 and record the value of the minimum allowable pressure with pressure sensors 8. Then, using the appropriate valves (on the pictures conventionally are not shown) of the air distributor 7 is produced depressurization of vacuum massage cupping-glasses 1 to the maximum pressure inside them, which ensures the possibility of their sliding mobility according to the patient's body without detachment from him. At this point, these valves of the air distributor 7 and with the help of pressure sensors 8 are fixed values, the maximum allowable pressures inside the vacuum massage cupping-glasses 1. Further, control system 10 enters data, which include the contours of body areas massaged, associated with the base coordinate system and the coordinates of the areas of the body that are not valid for massage effects, such as moles, sensitive and damaged skin, surgical wound, etc. Then the control system 10 gives the command to the vacuum pump 9 and the air distributor 7 to degas through the flexible hoses 6 and the respective valves of the air distributor 7 two fixed vacuum massage cupping-glasses 1 on surface of the patient's body and one sliding vacuum cupping-glass. After reaching in these fixed and sliding vacuum cupping-glasses the minimum allowable and maximum allowable pressures from the respective pressure sensors 8 through the ADC 15 receives analog signals into the control system 10 in which the control commands are formed, which through the corresponding DAC 16 and power amplifier 17 are fed to the closure of the valves of the air distributor 7 and the shutdown of the vacuum pump 9. After that, relative to the base coordinate system entering coordinates of the centers of the two fixed vacuum massage cupping-glasses and one sliding vacuum massage cupping-glasses and the distance between them. Then, the massager gives a command to perform the programmed massage movements for the sliding vacuum massage cupping-glass.

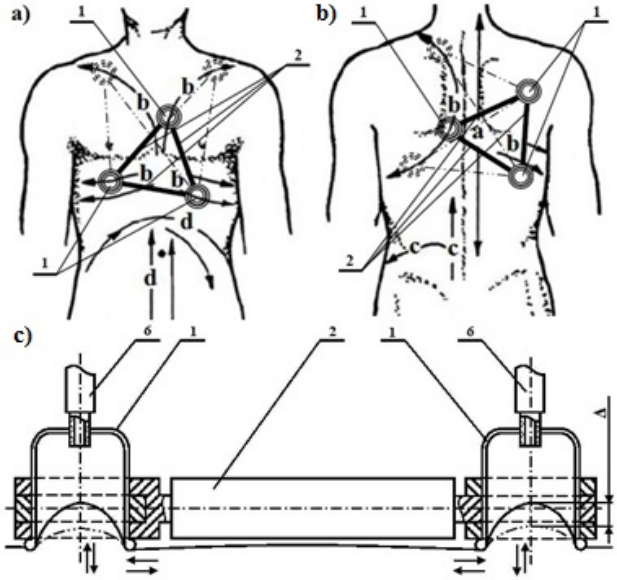


Figure 2 – Schemes of installation of self-propelled multifunctional cupping-glass massager and its massage movements in the front view (a) and rear (b); c - schemes of the local vacuum-massage and the massage by displacement and stretching the muscles through the massager

Figure 2 (a, b) schemes of the cupping-glass massage in various diseases are shown: a - in spinal osteochondrosis, lumbago; b - with pneumonia, bronchitis; c - with myositis, sciatica; d - colitis, hypertension [1]. As we can see in the above diseases impose the straight movements of the one sliding vacuum cupping-glass 1 and its movements along the circular arcs. After receipt of the command to the control system 10 in the

computer 11 (taking into account the previously entered data) the initial coordinates of the vacuum cupping-glasses 1 for carrying out massage movements of the vacuum cupping-glasses 1 are calculating, for example arcuate movements **b** (Fig. 2, a, b), from the condition of ensuring a minimum number of vacuum cupping-glasses rearrangements required to convert the selected path of movement, which depend on the maximum strokes of the linear drives 2. The active triangle module **ABC** can be installed in the initial position in such a way that each of his vacuum cupping-glasses 1 will be able to alternately perform the rolling massage movement on different trajectories of the movements of b without its permutations (Fig. 2, b). The movement of the massage vacuum cupping-glass 1 on the surface of the patient body is carried out by appropriately changing the lengths of the linear drives 2, controlled relative-displacement sensor 4. Thus the required speed of the massage movements of the vacuum cupping-glasses 1 on the patient body is provided by the speed control of axial movements of the linear drives 2 according to signals from the respective relative-velocity sensors 5. The geometric resistance of the active triangle module **ABC** allows you to define the coordinates of its vertices **A**, **B** and **C** by measuring by the relative-displacement sensor 4 of the lengths of all rods and control their movements similarly to the organization of spatial movements of the ***l***-coordinate manipulator [5]. The relative-velocity sensor 5 allow to control the speed of movement of the sliding vacuum cupping-glass at this stage of massage in accordance with the valid values, defined for this type of massage movements and introduced to the control system 10. It should be noted that all of the vacuum massage cupping-glasses 1 in the course of their rearrangements through sliding motions on the massaged surface of the patient body, alternately become floating and unmoveable. The process of their permutations as follows. In the active triangle module **ABC** one of the vacuum massage cupping-glasses (closest to his move) and the other two are roaming and unmoveable, respectively. While the maximum allowable air pressure sets in one roaming sliding massage vacuum cupping-glass, and in two fixed vacuum cupping-glasses – minimum allowable air pressure. After that, the control system is commanded to switch on the linear drives 2, is connected to the sliding vacuum massage cupping-glass 1 and produced a consistent change in their lengths at a given speed controlled by the relative-speed sensor 5. After moving the sliding vacuum massage cupping-glass 1 to a specified destination (or intermediate) point, determined by the relative-displacement sensor 4 associated linear drive 2, the command is made to switch them off. Then displacement of the sliding vacuum massage cupping-glass is becoming the fixed vacuum massage cupping-glass, and one of the two fixed vacuum massage cupping-glasses is becoming roaming. The pressure in the displaced vacuum massage cupping-glass is the minimum, and another is allowable maximum. Further, similar to the previous cycle from the control system is commanded to switch on the linear drive 2, is connected to the moving vacuum massage cupping-glass and produced a consistent change in their lengths at a given speed controlled by the relative-speed sensor 5. Then similarly do the movement of third vacuum massage cupping-glass in final or intermediate point. After displacement of all vacuum massage cupping-glasses in the calculation the initial coordinates two of the vacuum massage cupping-glasses are made unmoveable, and the third lying on the trajectory massage movements, for example the arc **b** (Fig. 2, b), make sliding cupping-glass and make her massage movements. Thus, depending on the desired massage motions, the estimated initial coordinates of vacuum massage cupping-glasses can be computed in such a way that all vacuum massage cupping-glasses will be on the trajectories required of massage movements, for example on the arcs b (Fig. 2, b). In this case, the massage can be performed sequentially and alternately. Permutations of triangular ABC module can be arranged in such a way that the trajectory of all movements massage cupping-glasses will coincide with the specified trajectory of massage movements in the process of permutations, i.e. there will not be "spurious" passages of vacuum massage cupping-glasses.

With moving massager can also produced a local vacuum massage [1] and the massage by sliding and stretching of the muscle tissue [6]. Figure 2 (C) the scheme of their conduct is shown. Local vacuum massage is performed at a fixed on the patient's body massage cupping-glasses 1 by the vacuum in the air up to a pressure whose value is in the range from the maximum pressure to the minimum pressure. For its implementation by commands from the control system in the massage vacuum cupping-glasses with established frequency and amplitude of the pressure change from the minimum permissible to the maximum and Vice versa. Management of alternate higher and lower pressure is carried out using the diffuser 7 and vacuum pump 9 according to the commands from the control system 10, formed as a result of processing the signals from the pressure sensors 8. The distance between the involved skin surface at the maximum pressure inside the jar and the involved skin surface with minimal pressure is Δ (Fig. 2). The distance Δ corresponds to the maximum value of the amplitude in the conduct of local vibration by varying the pressure in the massage vacuum cupping-glasses.

Massage by sliding and stretching the muscle tissues is produced, while still fixed on the patient's body massage cupping-glasses 1 by discharging air to the minimum allowable pressure. It is possible to carry out

this type of massage as alternate movement of the linear actuators, as the simultaneous movement of two or more linear actuators. After fixing the vacuum massage cupping-glasses 1 on the massaged area of the body of the patient (Fig. 2) at the position at which the length of the linear actuator 2 correspond to their average values, the control system 10 is commanded to the linear drive 2 on decrease (increase) its length at a predetermined value, after reaching which the linear actuator 2 is stopped and is switched on for reverse, increasing (decreasing) its length to a set value. The process is repeated at a given rate, the required number of cycles. The maximum change in length of the linear actuator 2 corresponds to a given vibrational amplitude of the massage movements of compression-tension. Changing the length of the linear actuator 2 and the amplitude are controlled by the relative movement of the sensor 4 and the speed – with the help of relative velocity sensor 5. The efforts of the mechanical effects of vacuum massage cupping-glasses 1 on the muscle tissue of the patient when performing all types of massage are controlled by the force sensor 3. In case of exceeding the set value of the effort in conducting a moving cupping massage, on command from the control system 10 produces an increase in pressure in the massage vacuum cupping-glass 1 by the amount of the established step and take him for the maximum allowed pressure value and continue massage. In case of exceeding a predetermined force value during the massage by sliding and stretching of muscle tissue, control system 10 reduces the magnitude of the amplitude which is set by the permissible forces in the extreme positions of the linear actuator 2 and continue the massage.

In case of spontaneous detachment of one of vacuum massage cupping-glasses from the patient's body during the massage unplanned increase in her pressure happens, as in the control system 10 receives the corresponding signal from the pressure sensor 8. In response to the situation the control system 10 will give the appropriate command to the distributor valve 7 and vacuum pump 9. It should be noted that the active triangular bearing module ABC on the massaged area of the body of the patient occurs at three points in the form of vacuum massage cupping-glasses 1. Therefore, in the case of the horizontal position of the patient gravity from 1/3 the weight of the active triangle module ABC will be enough for a snug fit to the surface of the seal body vacuum massage cupping-glasses 1 and subsequent suction to the body after lowering the pressure to the minimum allowable value. This will mean that the massage vacuum cupping-glass 1 is recorded on the patient's body and the massage will continue in accordance with the established program. In the case that the pressure decrease in the cupping-glass is not going to happen, from the control system 10 will receive the signal about the movement of the massage vacuum cupping-glasses to a new location and repeat the procedure vacuum. And, in the case of repeated unsuccessful attempts, from the control system 10 the massage therapist will receive the signal about emergency situation, for correction of which requires his involvement. After the liquidation of the emergency situation massage therapist, the massage procedure will be continued offline.

The proposed concept can be used in physiotherapy offices, hospitals, rehabilitation, sports and Wellness centers, as well as at home to conduct Autonomous self-massage hard to reach areas of the body. The use of moving massager will allow you to automate the process of cupping massage and to improve its efficiency by increasing the number of simultaneously roaming vacuum massage cupping-glasses up to three more (with the capacity of moving massager additional linear actuators and a massage vacuum cupping-glasses), as well as significantly increase the number of concurrent patients with a single therapist and reduce his physical weariness and fatigue. Thus it’s possible additional installation of sensors at the vertices of a triangular active module ABC, e.g. ultrasound, which will allow you to extend the functionality of the massager moving.

1. Dubrovsky V.I., Dubrovskaya A.V. Lechebnyy massazh. Izd. M.: GEOTAR-Media. 2004, 505 p. (in Russian).
2. http://www.alibaba.com/product-gs/637683842/Vacuum Therapy Machine_for_Massage Cupping Machine
3. Sayapin S.N., Sayapina M.S. Movable Massaging Apparatus and Method for Giving Massage with use thereof. Invention Patent of RF Num. 2551939.Date of publication: 10.06.2015 Bull. № 16. (in Russian).
4. Glazunov V.A., Koliskor A.Sh., Kraynev A.F. Prostranstvennye mechanizmy parallelnoy structury. M.: Nauka, 1991. 95 p. (in Russian).
5. Koliskor A.Sh. Razrabotka I issledovanie promyshlennych robotov na osnove *l*-coordinat// Stanki I instrument, 1982. Num. 12. Pp. 21-24. (in Russian).
6. Vasichkin V.I. Vse o massage. –M.: AST-PRESS, 1998, 368 p. (in Russian).

С.Н. Саяпин[1], М.С. Саяпина[2]

САМОПЕРЕМЕЩАЮЩИЙСЯ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ БАНОЧНЫЙ МАССАЖЕР НА БАЗЕ АКТИВНОГО ТРЕУГОЛЬНОГО МОДУЛЯ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ

[1]ИМАШ РАН им. А.А. Благонравова, Москва
S.Sayapin@rambler.ru
[2]ФГБНУ «РОНЦ им. Н.Н. Блохина», Москва
Maria.Sayapina@mail.ru

Аннотация

Представлена новая концепция многофункционального самоперемещающегося баночного массажера, построенного на базе активного треугольного модуля параллельной структуры. Описаны конструктивные принципы и функциональные возможности массажера, позволяющие автоматизировать процесс скользящего баночного массажа.

Ключевые слова: скользящий баночный массаж, самоперемещающийся массажер, плоскиq параллельные роботы, модульные роботы.

Для лечения и профилактики развития лимфостаза после мастэктомии, лапаротомии, холецистэктомии и др. полостных операций, а также проведения антицеллюлитных процедур широко применяется баночный массаж, сочетающий в себе воздействующие факторы банок и массажа. Кроме того, баночный массаж показан также при простудных заболеваниях, бронхите, пневмонии, миозитах, люмбаго, остеохондрозе позвоночника, не острой форме пояснично-крестцовых радикулитов, колитах и др. [1]. В современных условиях банки соединены вакуумными шлангами с аппаратом, обеспечивающим их вакуумирование и другие режимы работы. При этом аппарат может быть как переносным, так и стационарным, а банки могут устанавливаться на теле пациента как неподвижно, так и с возможностью совершения ими скользящих массажных движений без их разгерметизации и отрыва от тела. В первом случае после установки комплекта банок их не перемещают, а оказывают лишь локальное воздействие на кожу пациента в местах установки банок. При этом присутствие массажиста не требуется. В результате из-за отсутствия скользящих массажных движений снижается эффективность проведения массажа, а в ряде случаев, например, при остеохондрозе позвоночника, и др., данная процедура вообще не эффективна. В случае скользящего баночного массажа движение банки осуществляет массажист, что ограничивает количество перемещаемых одновременно банок до 2-х. При этом массажист способен производить скользящий баночный массаж единовременно только одному пациенту. Это снижает пропускную способность массажиста и повышает его утомляемость. Для повышения производительности и расширения функциональных возможностей скользящего баночного массажа применяют различные устройства, например, «Vacuum Therapy Machine for Massage Cupping Machine» модели MCWNV-600 (рис. 1, а) [2].

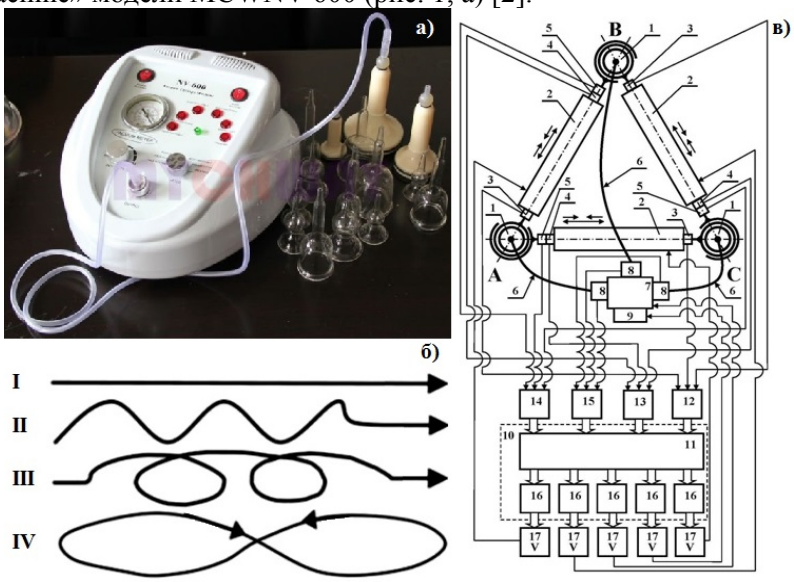


Рисунок 1 –Вакуумная терапевтическая машина для скользящего баночного массажа (а); основные массажные движения вакуумной банкой (б); самоперемещающийся баночный массажер (в)

На рис. 1 (б) показаны основные массажные движения, осуществляемые с помощью массажной вакуумной банки: I– прямолинейное, II– зигзагообразное, III– спиральное и IV- восьмеркообразное.

Таким образом, создание роботизированных перемещающихся по телу пациента массажных устройств, способных работать автономно без присутствия массажиста, является актуальной задачей. В настоящей работе предлагается новая концепция многофункционального перемещающегося массажера, построенного на базе активного треугольного модуля параллельной структуры [3], характеризующейся высокой удельной жесткостью, несущей способностью и низкой удельной массой [4]. Предлагаемая концепция позволит автоматизировать процесс баночного массажа, при этом:

- массажист способен организовать автономное проведение баночного массажа нескольким пациентам одновременно, а также проведение баночного массажа несколькими банками в положении сидя или стоя тремя массажными банками на груди и тремя массажными банками на спине пациента одновременно и, как следствие, повысить производительность проведения баночного массажа;
- появляется возможность проведения массажа сдвиганием и растяжением мышечных тканей одновременно тремя массажными банками, что повышает производительность процесса массажа;
- появляется возможность проведения автономного баночного самомассажа для труднодоступных участков тела, например спины, и обеспечения контролируемого перемещения массажных банок и обхода двигающимися массажными банками участков тела, недопустимых для массажных воздействий, таких как родинки, чувствительные и поврежденные участки кожи, послеоперационные раны и др.;
- автономный баночный массаж не требует специального помещения и может проводиться как в постели больного, так и в домашних условиях;
- у массажиста высвобождается дополнительное время, которое может быть задействовано для проведения других видов массажа и, как следствие, появляется возможность увеличения количества обслуживаемых пациентов в смену;
- снижается физическая усталость массажиста, что способствует повышению его производительности труда и улучшению самочувствия в конце рабочей смены.

Самоперемещающийся массажер (рис. 1, в) содержит массажное устройство в виде активного треугольного модуля **ABC**, стороны которого **AB**, **BC** и **CA** выполнены в виде однотипных стержней, концы которых шарнирно соединены в вершинах треугольного модуля **A**, **B** и **C** с массажными вакуумными банками 1. При этом каждый из стержней снабжен линейным приводом 2 с датчиками силы 3, относительного перемещения 4 и относительной скорости 5, а все вершины треугольного модуля **ABC** выполнены с возможностью соединения через них подобных стержней с образованием дополнительных активных треугольных структур. Массажные вакуумные банки 1 установлены в вершинах активного треугольного модуля **ABC** и образуют устройство его дискретной фиксации. При этом каждая из массажных вакуумных банок 1 герметично соединена гибким шлангом 6 с соответствующим каналом воздухораспределителя 7 системы вакуумирования, снабженной датчиком давления 8 и вакуумным насосом 9, электрически связанных с системой управления 10 в виде компьютера 11 с аналого-цифровыми и цифро-аналоговыми преобразователями (АЦП и ЦАП) и соответствующим программно-алгоритмическим обеспечением, при этом входы системы управления 10 через шины данных аналого-цифровых преобразователей (АЦП) подключены к выходам АЦП 12, 13, 14 и 15 датчиков силы 3, датчиков относительного перемещения 4, датчиков относительной скорости 5 и датчиков давления 8 соответственно, а выходы системы управления 10 через шины выходных данных ЦАП 16 подключены к входам последовательно соединенных усилителей мощности 17 и линейных приводов 2, клапанов воздухораспределителя 7 и вакуумного насоса 9. При этом система управления 10, выполнена с возможностью оперативного контроля и управления в реальном режиме времени.

Перемещающийся массажер, работает следующим образом. На предварительно смазанную разогретым маслом массируемую поверхность тела пациента [1] накладывают активный треугольный модуль ABC с массажными вакуумными банками 1 в его вершинах (рис. 2, а, б). При этом начальное положение активного треугольного модуля ABC на массируемом участке поверхности тела пациента произвольное. Затем включают вакуумный насос 9 (рис. 1, в), герметично соединенный гибким шлангом 6 через воздухораспределитель 7 с массажными вакуумными банками 1 и после их индивидуального присасывания и втягивания кожи на величину, обеспечивающую надежную фиксацию массажных вакуумных банок 1 и исключающую травматизм кожи пациента, которую определяют визуально, закрывают соответствующий клапан (на рисунках не показан) воздухораспределителя 7 и фиксируют величину минимально допустимого давления с помощью

датчиков давления 8. После этого с помощью соответствующих клапанов (на рисунках условно не показаны) воздухораспределителя 7 производят разгерметизацию массажных вакуумных банок 1 до максимально допустимого давления внутри них, которое обеспечивает возможность их скользящей подвижности по телу пациента без отлипания от него. В этот момент указанные клапаны воздухораспределителя 7 перекрывают и с помощью датчиков давления 8 фиксируют величины максимально допустимых давлений внутри массажных вакуумных банок 1. Далее в систему управления 10 вводят данные, которые включают контуры массируемых участков тела, связанные с базовой системой координат и координаты участков тела, недопустимых для массажных воздействий, таких как родинки, чувствительные и поврежденные участки кожи, послеоперационные раны и др. Затем подают команду на вакуумирование массажных вакуумных банок 1 при этом из неперемещаемых массажных вакуумных банок 1 с помощью вакуумного насоса 9 через соответствующие клапаны воздухораспределителя 7 и гибкие шланги 6 откачивают воздух. После достижения в двух неперемещаемых и одной перемещаемой вакуумных банках соответственно минимально допустимого и максимально допустимого давлений, от соответствующих датчиков давления 8 через АЦП 15 поступают аналоговые сигналы в систему управления 10 в которой формируются управляющие команды, которые через соответствующие ЦАП 16 и усилители мощности 17 подаются на закрытие соответствующих клапанов воздухораспределителя 7 и выключение вакуумного насоса 9. После этого относительно базовой системы координат вводят координаты центров двух неперемещаемых вакуумных банок 1 и расстояние между ними. Затем массажист включает команду на выполнение запрограммированных для перемещаемой массажной банки массажных движений.

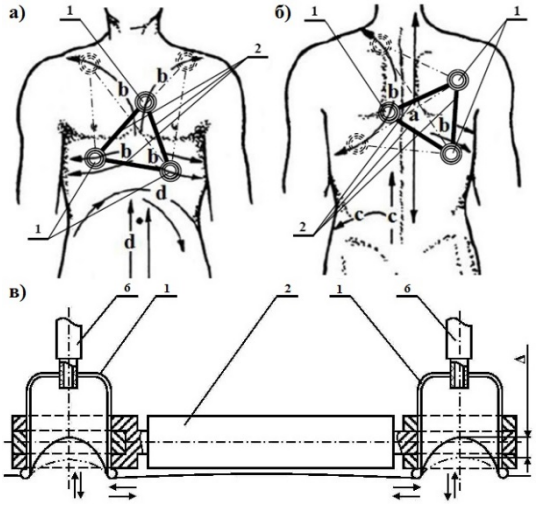


Рисунок 2 – Схема установки самоперемещающегося массажера и проведения баночного массажа с его помощью на виде спереди (а) и сзади (б); в - схемы проведения локального вакуум-массажа и массажа сдвиганием и растяжением мышц с помощью перемещающегося массажера

На рисунке 2 (а, б) показаны схемы проведения баночного массажа при различных заболеваниях: a - при остеохондрозе позвоночника, люмбаго; b - при пневмониях, бронхитах; c - при миозитах, пояснично-крестцовом радикулите; d - при колитах, гипертонической болезни [1]. Как видно из рисунка при указанных выше заболеваниях применяют прямолинейные движения перемещаемой массажной вакуумной банки 1 и ее движение по дугам окружностей. После поступления команды в систему управления 10 в компьютере 11 вычисляются (с учетом введенных ранее данных) первоначальные координаты массажных вакуумных банок 1 для проведения массажных движений перемещаемой массажной вакуумной банки 1, например дугообразных движений b (рис. 2, а, б), из условия обеспечения минимального количества перестановок массажных вакуумных банок, требуемых для совершения выбранной траектории движения, которые зависят от максимальных рабочих ходов линейных приводов 2. При этом активный треугольный модуль ABC может быть установлен в начальное положение таким образом, что каждая из его массажных вакуумных банок будет способна поочередно совершать скользящее массажное движение по различным траекториям движений b без его перестановки (рис. 2, б). Движение массажных вакуумных банок 1 по телу пациента осуществляется путем соответствующего изменения длин линейных приводов 2, контролируемых датчиками относительного перемещения 4. При этом требуемая скорость движения массажных вакуумных банок 1 по телу пациента обеспечивается регулированием скоростей осевых перемещений линейных приводов 2 по сигналам от

соответствующих датчиков относительной скорости 5. Геометрическая неизменяемость активного треугольного модуля ABC и текущая привязка координат массажных вакуумных банок 1 к базовой системе координат (на рис. 2, а, б, подвижные стрежни изображены штрих-двойными пунктирными линиями) позволяют в процессе массажа однозначно определять текущие координаты перемещаемой и неперемещаемых массажных вакуумных банок 1 относительно базовой системы координат (на рисунках не показана) и связанных с ней контура массируемого участка тела пациента и участков тела, на которых массаж недопустим. Геометрическая неизменяемость активного треугольного модуля ABC позволяет определять координаты его вершин путем измерения с помощью датчиков относительного перемещения 4 длин всех стержней и управлять их перемещениями аналогично организации пространственных перемещений *l*-координатного манипулятора [5]. При этом показания датчиков относительной скорости 5 позволяют управлять скоростью движения перемещаемой на данном этапе массажной банки 1 в соответствии с допустимыми значениями, определенными для данного вида массажных движений и введенных в систему управления 10. Следует отметить, что все вакуумные массажные банки 1 в процессе их перестановок с помощью скользящих движений по массируемой поверхности тела пациента, поочередно становятся перемещаемыми и неперемещаемыми. При этом процесс их перестановок производится следующим образом. В активном треугольном модуле ABC одна из массажных вакуумных банок 1 (наиболее близкая к месту своего перемещения) и две остальные делаются перемещаемой и неперемещаемыми соответственно. При этом в перемещаемой массажной вакуумной банке устанавливается максимально допустимое давление воздуха, а в неперемещаемых – минимально допустимое давление воздуха. После этого от системы управления подается команда на включение линейных приводов 2, соединенных с перемещаемой массажной вакуумной банкой 1 и производится согласованное изменение их длин с заданной скоростью, контролируемой датчиками относительной скорости 5. После перемещения массажной вакуумной банки 1 в заданную конечную (или промежуточную) точку, определяемую с помощью датчиков относительного перемещения 4 связанных с ней линейных приводов 2, подается команда на их выключение. Затем перемещенная массажная вакуумная банка 1 делается неперемещаемой, а одна из двух неперемещаемых массажных вакуумных банок – перемещаемой. При этом давление в перемещенной массажной вакуумной банке 1 устанавливается минимально допустимым, а в другой – максимально-допустимым. Далее аналогично предыдущему циклу от системы управления подается команда на включение линейных приводов 2, соединенных с перемещаемой массажной вакуумной банкой 1 и производится согласованное изменение их длин с заданной скоростью, контролируемой датчиками относительной скорости 5. После этого аналогично совершают перемещение третьей массажной вакуумной банки в конечную или промежуточную точку. После перемещения всех вакуумных массажных банок в расчетные первоначальные координаты две из массажных вакуумных банок 1 делают неперемещаемыми, а третью, лежащую на траектории массажного движения, например, дуги b (рис. 2, б), делают перемещаемой и совершают ей массажные движения. При этом, в зависимости от требуемых массажных движений, расчетные первоначальные координаты массажных вакуумных банок могут быть вычислены таким образом, что все массажные вакуумные банки окажутся на траекториях требуемых массажных движений, например, на дугах b (рис. 2, б). В этом случае массаж может выполняться как последовательно, так и поочередно. Перестановки треугольного модуля ABC возможно организовать таким образом, что траектории движений всех массажных банок в процессе перестановок будут совпадать с заданными траекториями массажных движений, т.е. не будет «паразитных» проходов вакуумных массажных банок.

С помощью перемещающегося массажера можно производить также локальный вакуум-массаж [1] и массаж сдвиганием и растяжением мышечных тканей [6]. На рисунке 2 (в) показаны схемы их проведения. Локальный вакуум-массаж производят при зафиксированных на теле пациента массажных банках 1 путем разряжения в них воздуха до давления, значение которого находится в диапазоне от максимально допустимого давления до минимально допустимого давления. Для его осуществления по командам от системы управления в массажных вакуумных банках с установленными частотой и амплитудой изменяют давление от минимально допустимого до максимально допустимого и наоборот. Управление поочередным повышением и понижением давления осуществляется с помощью воздухораспределителя 7 и вакуумного насоса 9 по командам от системы управления 10, формируемых в результате обработки сигналов от датчиков давления 8. Расстояние между втянутой поверхностью кожи при максимальном давлении внутри банки и втянутой поверхностью кожи при минимальном давлении составляет Δ (рис. 2, в). При этом расстояние Δ соответствует максимальному значению амплитуды при проведении локального вибромассажа путем изменения давления в массажной вакуумной банке.

Массаж сдвиганием и растяжением мышечных тканей производят при неподвижно зафиксированных на теле пациента массажных банках 1 путем разряжения в них воздуха до минимально допустимого давления. При этом возможно проведение данного вида массажа как поочередным движением линейных приводов, так одновременным движением двух и более линейных приводов. После фиксации массажных вакуумных банок 1 на массируемом участке тела пациента (рис. 2, в) в положении, при котором длины линейных приводов 2 соответствуют их средним значениям, системы управления 10 подается команда линейному приводу 2 на уменьшение (увеличение) его длины на заданную величину, после достижения которой линейный привод 2 останавливается и включается на реверс, увеличивая (уменьшая) свою длину до установленной величины. Далее процесс повторяется с заданной скоростью требуемое количество циклов. При этом максимальное изменение длины линейного привода 2 соответствует заданной амплитуде колебательных массажных движений сжатия-растяжения. Изменение длины линейного привода 2 и амплитуду контролируют с помощью датчика относительного перемещения 4, а скорость движения – с помощью датчика относительной скорости 5. Усилия механического воздействия массажных вакуумных банок 1 на мышечную ткань пациента при проведении всех видов массажа контролируют с помощью датчиков силы 3. В случае превышения заданного значения усилия при проведении скользящего баночного массажа, по команде от системы управления 10 производят повышение давления в массажной вакуумной банке 1 на величину установленного шага и принимают его за максимально допустимое значение давления и продолжают массаж. В случае превышения заданного значения усилия при проведении массажа сдвиганием и растяжением мышечных тканей, система управления 10 уменьшает величину амплитуды, которая устанавливается по допустимым усилиям в крайних положениях линейного привода 2 и продолжают массаж.

В случае самопроизвольного отлипания одной из массажных вакуумных банок от тела пациента в процессе проведения массажа произойдет незапланированное повышение в ней давления, о чем в систему управления 10 поступит сигнал от соответствующего датчика давления 8. В ответ на возникшую ситуацию система управления 10 подаст соответствующую команду на клапан воздухораспределителя 7 и вакуумный насос 9. При этом следует отметить, что опирание активного треугольного модуля АВС на массируемый участок тела пациента происходит на три точки в виде массажных вакуумных банок 1. Поэтому в случае горизонтального положения пациента силы тяжести от 1/3 веса активного треугольного модуля АВС будет достаточно для плотного прилегания к поверхности тела разгерметизированной массажной вакуумной банки 1 и ее последующего присасывания к телу после понижения давления в ней до минимально допустимого значения. Это будет означать, что массажная вакуумная банка 1 вновь зафиксирована на теле пациента и массаж будет продолжен в соответствии с установленной программой. В случае, если понижение давления в банке не произойдет, от системы управления 10 поступит сигнал о перемещении данной массажной вакуумной банки на новое место и повторение процедуры вакуумирования. И, в случае повторной неудачной попытки, от системы управления 10 массажисту поступит сигнал о нештатной ситуации, для исправления которой требуется его участие. После ликвидации массажистом нештатной ситуации, процедура массажа будет продолжена в автономном режиме.

Предлагаемая концепция может быть использована в физиотерапевтических отделениях лечебных учреждений, реабилитационных, спортивных и оздоровительных центрах, а также в домашних условиях для проведения автономного самомассажа труднодоступных участков тела. Применение перемещающегося массажера позволит автоматизировать процесс баночного массажа и повысить его эффективность за счет увеличения количества одновременно перемещаемых массажных вакуумных банок до трех и более (при наращивании перемещающегося массажера дополнительными линейными приводами и массажными вакуумными банками), а также существенно увеличить количество одновременно обслуживаемых пациентов одним массажистом и снизить его физическую усталость и утомляемость. При этом в вершинах активного треугольного модуля АВС возможна дополнительная установка датчиков, например ультразвуковых, что позволит расширить функциональные возможности перемещающегося массажера.

1. Дубровский В.И., Дубровская А.В. Лечебный массаж. Изд. М.: ГЭОТАР-Медиа. 2004, 505 с.
2. http://www.alibaba.com/product-gs/637683842/Vacuum Therapy Machine_for_Massage Cupping Machine
3. Саяпин С.Н., Саяпина М.С. Перемещающийся массажер и способ осуществления массажа с его помощью. Патент РФ на изобретение № 2551939. Опубл. 10.06.2015, Бюл. № 16.
4. Глазунов В.А., Колискор А.Ш., Крайнев А.Ф. Пространственные механизмы параллельной структуры. М.: Наука, 1991. 95 с.
5. Колискор А.Ш. Разработка и исследование промышленных роботов на основе *l*-координат// Станки и инструмент, 1982. №12. С. 21-24.
6. Васичкин В.И. Всё о массаже. –М.: АСТ-ПРЕСС, 1998, 368 с.

R.A. Munasypov, T.R. Shakhmametyev, S.S. Moskvichev,P.V. Sletnev, I.V. Meshkov

HIGH MOBILITY ROBOTIC PLATFORM FOR SHIP STRUCTURAL ELEMENTS INSPECTION

Ufa State Aviation Technical University (USATU)
rust40@mail.ru, shahmametevtr@gmail.com, mosk.sergey@gmail.com
sletnev@yandex.ru, igor94.meshkov@yandex.ru

Abstract

Ship's hull inspection is a difficult, time-consuming and dangerous task. Robotic solutions are an alternative to manual methods, but existing solutions don't exhibit the levels of mobility and maneuverability required for operation in the internal structure of the hull. The article focuses on the development of a high mobility robotic platform based on magnetic wheels capable of traversing obstacles and complex surfaces.

Keywords: ship hull inspection, robotic inspection, high mobility robot.

Р.А. Мунасыпов, Т.Р. Шахмаметьев, С.С. Москвичёв, П.В. Слетнёв, И.В. Мешков

РОБОТИЗИРОВАННАЯ ПЛАТФОРМА ВЫСОКОЙ МОБИЛЬНОСТИ ДЛЯ ЗАДАЧ ДИАГНОСТИКИ ЭЛЕМЕНТОВ СУДОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ

ФГБОУ ВО УГАТУ, г. Уфа
rust40@mail.ru, shahmametevtr@gmail.com, mosk.sergey@gmail.com
sletnev@yandex.ru, igor94.meshkov@yandex.ru

Аннотация

Диагностические работы внутри корабля являются трудоемкой задачей, сопряженной с опасностью для обслуживающего персонала. Роботизированные решения являются альтернативой ручным методам контроля, однако существующие разработки не удовлетворяют требованиям мобильности и проходимости в условиях набора корпуса корабля. Данная статья посвящена разработке высокомобильной роботизированной колесной платформы на основе магнитных движителей, способной преодолевать препятствия сложной конфигурации.

Ключевые слова: диагностика корпуса судна, роботизированная диагностика, робот высокой мобильности

Введение

Сложность судоремонтных операций и невозможность в некоторых случаях определить степень износа отдельных деталей и узлов не позволяют при составлении ведомостей учесть все работы, которые необходимо будет выполнить при ремонте. С целью окончательного уточнения объема работ сразу же после постановки судна в ремонт производится заводская дефектация, которая должна быть закончена в течение первой трети планового срока ремонта судна. В результате определяются окончательный объем и расчетный срок ремонта. Это дает возможность составить заводской технологический (сетевой) график ремонта судна с указанием сроков и общей последовательности работ [1].

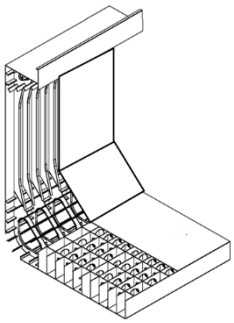


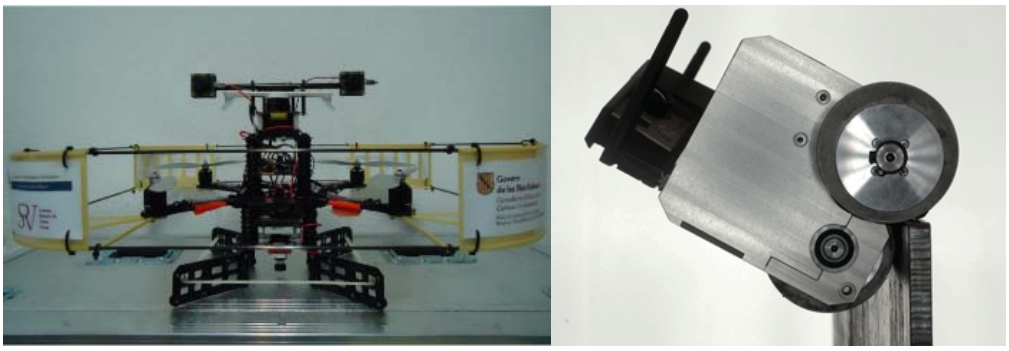
Рисунок 1 – Набор корпуса корабля

Мобильные роботизированные комплексы, применяемые в судостроении и судоремонте, используются для задач визуального осмотра, выявления дефектов и в некоторых случаях ремонта. Для движения по вертикальной или горизонтальной поверхности и удержания равновесия применяются различные физические явления и устройства, такие как присоски, вакуумные устройства, адгезионные

устройства, переменные или постоянные магниты и др. Система набора корабля имеет ряд переходов, являющихся для мобильного робота препятствиями, требующими высокой маневренности и проходимости (рис.1).

Одним из существующих решений является летающая система контроля *MAV* (рис. 2а), которая позволяет осуществить быстрый визуальный осмотр структуры внутри корпуса или надстройки судна [2]. Недостатками данного решения являются нестабильность, малое время работы, а также невозможность обеспечения непрерывной диагностики всего пространства.

Для проведения визуальной инспекции внутри балластной цистерны судна применяется робот *SIR* (рис. 2б) с перекрывающимися колесами на основе постоянных магнитов, позволяющими преодолевать препятствия типа полособульб [3]. Однако данное решение неспособно преодолевать препятствия и переходы, расположенные под углом 90 градусов друг к другу и другие элементы более сложной формы.



а б

а – *MAV*; б – *SIR*

Рисунок 2 – Роботизированные диагностические решения

Было решено разработать платформу высокой мобильности, способную преодолевать металлоконструкции сложной формы, включая такие элементы как полособульб, *L-, T-, I*-образные балки и другие.

Роботизированная платформа высокой мобильности

Для перемещения роботизированной платформы по ферромагнитной поверхности предлагается использовать постоянные магниты, поскольку они обладают следующим рядом преимуществ [4]:

- Постоянное сцепление с металлической поверхностью.
- Способность перемещения по вертикальным, наклонным поверхностям и потолку.
- В случае нештатной ситуации или прекращения подачи питания сцепление с поверхностью сохраняется.

Разработанная платформа выполнена по трехколесной схеме с артикулированными колесными движителями на основе постоянных магнитов (рис. 3). Платформа включает два модуля, соединенных пассивным шарнирным узлом с механическими упорами для возможности компенсирования неровностей.

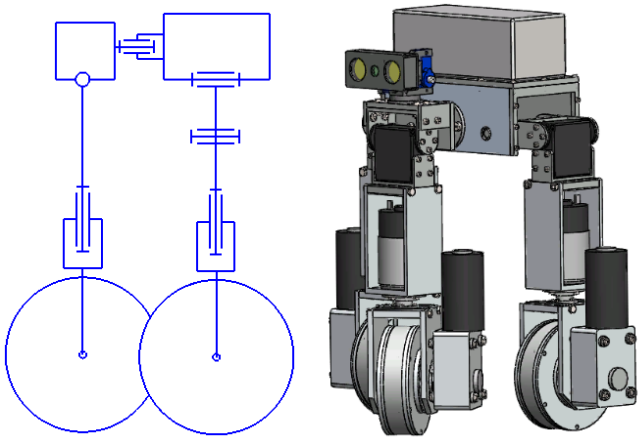


Рисунок 3 – Роботизированная мобильная платформа

Для прохождения препятствий типа полособульб платформа оснащается двигателем, способным изменять межосевое расстояние (рис. 4).

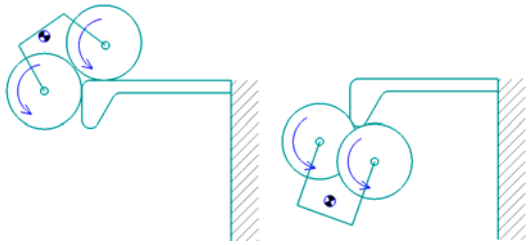


Рисунок 4 – Пример прохождения препятствия типа полособульб

Эффект перекрывающихся колес позволяет в любой момент времени обеспечить нахождение точек контакта колес обоих модулей с поверхностью даже на небольшой площадке (рис.5).

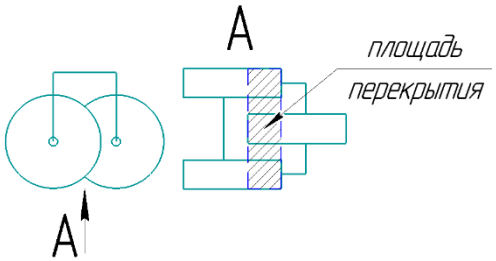


Рисунок 5 – Эффект перекрывающихся колес

Для прохождения переходов между поверхностями, расположенными под углом 90 градусов, применена конструкция колеса, позволяющая регулировать направление вектора магнитного притяжения (рис. 6) [5].

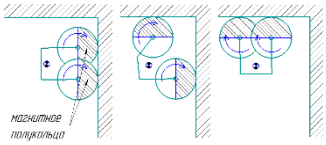


Рисунок 6 – Переход с вертикальной на горизонтальную поверхность

При достижении передним колесом горизонтальной поверхности производится поворот магнитного полукольца таким образом, что вектор силы притяжения ориентируется перпендикулярно поверхности, после чего платформа продолжает движение и повторяет операцию для задних колес.
Для осуществления разворота на месте применяются приводы, расположенные над колесами (рис. 7).

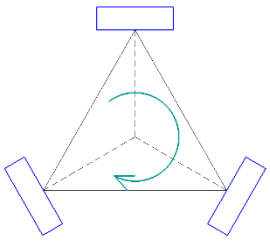


Рисунок 7 – Разворот платформы на месте

При передвижении платформы по корпусу судна необходимо компенсировать неровности и удерживать вектор магнитного притяжения перпендикулярно поверхности. Для этого используется совокупность пассивного и активного шарнирных узлов (рис. 8).

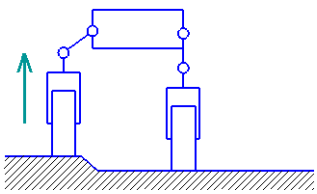


Рисунок 8 – Компенсирование неровностей задним колесным модулем

Планируется сделать конструкцию платформы модульной, с возможностью оперативной замены технологического оборудования: манипуляторов, плазменных горелок, сварочного оборудования, инструментальных головок, диагностического оборудования и т.д.

Круг задач роботизированной мобильной платформы может включать в себя:

- Очистку корпуса судна от биологического нароста.
- Диагностику корпуса: подводные части корпуса (наружная обшивка и набор), бортовая обшивка и набор до ватерлинии, а также отсеки междудонного пространства (балластные, топливные и пресной воды).
- Лакокрасочные работы, шлифовку, сварку, резку.

Большей производительности при использовании роботизированных платформ можно добиться, разделив одну сложную задачу на ряд более простых подзадач и распределив их по скоординированной группе роботов. Задача перед роботами ставится оператором, однако наилучшая последовательность действий будет вырабатываться иерархической системой управления (рис. 9), где каждый робот в группе будет выполнять свою подзадачу, так что роботы могут быть оборудованы различным инструментальным оборудованием.

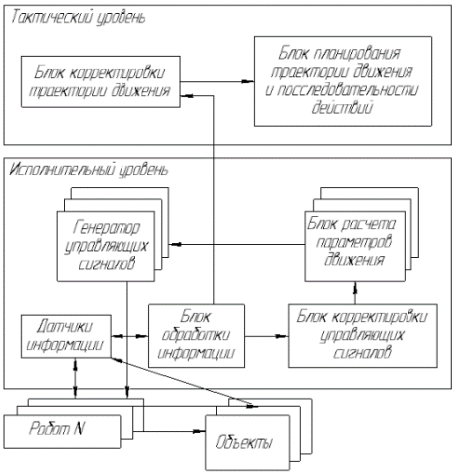


Рисунок 9 – Структурная схема системы управления группой роботов

В системе управления можно выделить следующие уровни:

Тактический уровень — решение задачи определения траектории перемещения каждого отдельного мобильного робота в соответствии с разработанным на стратегическом уровне планом. На этом уровне необходимо использование компьютерного зрения роботов, их совместного скоординированного перемещения, корректировка требуемого и реального положения роботов и отслеживание динамически изменяющейся окружающей обстановки.

Исполнительный уровень — уровень определения параметров движения, которые будут преобразованы в напряжения на приводах роботов для осуществления требуемой траектории движения.

Согласующий уровень — уровень синхронизации процессов между различными уровнями системы управления.

Уровень анализа и обучения — уровень, осуществляющий поставленную задачу перед роботами в случае изменений окружающего пространства.

Скоординированная группа роботов может потребоваться для выполнения сложных задач, требующих нескольких исполнителей (захват и транспортировка крупногабаритных и тяжелых грузов), или задач, при которых использование нескольких роботов существенно увеличит производительность работ (операции параллельного диагностирования).

Заключение

Мобильная платформа с колесными движителями на основе постоянных магнитов позволяет обеспечить лучшие показатели проходимости по сравнению с роботизированными решениями, построенными по другим принципам. Наличие нескольких степеней свободы в конструкции колесного узла позволяет управлять расположением колес относительно друг друга, что дает возможность корректировать межосевое расстояние и увеличивать площадь контакта колес с поверхностью при прохождении полособульбов, *L-, T-, I*-образных балок и других конструктивных элементов сложной формы.

1. Водный транспорт, теория и практика, все о морских и речных судах. Устройство и техническая эксплуатация судна. Организация судоремонта. URL: http://wc.matrixplus.ru/utes10-001.htm. — (дата обращения: 26.05.2016).
2. Kristin Fondahl, Markus Eich, Johannes Wollenberg, Frank Kirchner. A Micro Aerial Vehicle for Vessel Visual Inspection Assistance// Proceedings of XI International Conference on Computer and IT Applications in the Maritime Industries (COMPIT). 2012.Pp. 146–159.
3. Ship Inspection Robot. URL: http://www.sir.ethz.ch. — (датаобращения: 24.05.16).
4. Балашов В.С., Громов Б.А., Ермолов И.Л. Автономный робот для очистки корпусов судов HISMAR // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. № 9. С. 42–48.
5. Мунасыпов Р.А., Шахмаметьев Т.Р., Москвичев С.С. Телеуправляемый диагностический комплекс на основе робота высокой мобильности // Экстремальная робототехника. Труды международной научно-технической конференции. — Санкт-Петербург: Изд-во «Политехника-сервис», 2014. — 416 с.

A.U. Sedov, I.B. Pryamitsyn, A.L. Korotkov, A.V. Rogov, O.A. Shmakov

DESIGN INSTALLATION FEATURES OF THE DRIVES OF THREADED-PLATFORM WITH VARIABLE CONFIGURATION OF CHASSIS

CRDI RTC, Saint-Petersburg
a.sedov@rtc.ru

Abstract

This paper describes design aspects of building platforms with variable geometry track chassis. Different layout schemes of constructing interior space of track chassis are compared.

Keywords: threaded-platform, layout scheme, platform with variable geometry, lever arm, gearmotor.

А.Ю. Седов, И.Б. Прямицын, А.Л. Коротков, А.В. Рогов, О.А. Шмаков

КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ РАЗМЕЩЕНИЯ ПРИВОДОВ ГУСЕНИЧНЫХ ПЛАТФОРМ С ИЗМЕНЯЕМОЙ ГЕОМЕТРИЕЙ ШАССИ

ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург
a.sedov@rtc.ru

Аннотация

В статье описаны конструктивные особенности построения платформ с изменяемой геометрией гусеничного шасси. Приведено сравнение нескольких компоновочных схем построения внутреннего пространства гусеничного шасси.

Ключевые слова: гусеничное шасси, компоновочная схема, платформа с изменяемой геометрией, рычаг, мотор-редуктор.

В настоящее время в качестве наземных разведывательных роботов легкого и среднего классов с изменяемой геометрией шасси, активно применяется схема компоновки с вспомогательными рычагами. Вспомогательные рычаги существенно повышают проходимость шасси за счет возможности увеличения клиренса и изменения конфигурации взаимного положения пятен контакта на опорной поверхности. Такая модернизация гусеничного шасси вносит дополнительные элементы, уменьшающие свободное полезное пространство внутри корпуса робота. Чаще всего применяют приводные пассивные рычаги или приводные с активными движителями. В случае применения рычагов с активными движителями проходимость робота существенно возрастает по сравнению с пассивными за счет наличия приводных гусеничных движителей на рычагах. Наличие активных движителей на рычагах влечет за собой их усложнение и увеличение массы изделия. Оси поворота рычагов зачастую, проходят через главные оси приводов основных движителей. В таком случае компоновка обладает рядом преимуществ, но усложняет конструкцию подшипниковых узлов, связанную с передачей крутящего момента на рычаги через главные (в том числе и приводные) оси колес основных движителей.

В случае применения мотор-редукторов в качестве привода маршевых гусениц и поворота рычагов предлагаются две наиболее простые компоновки элементов конструкции. Варианты компоновок шасси с четырьмя активными движителями на рычагах представлены на рисунках 1 и 2.

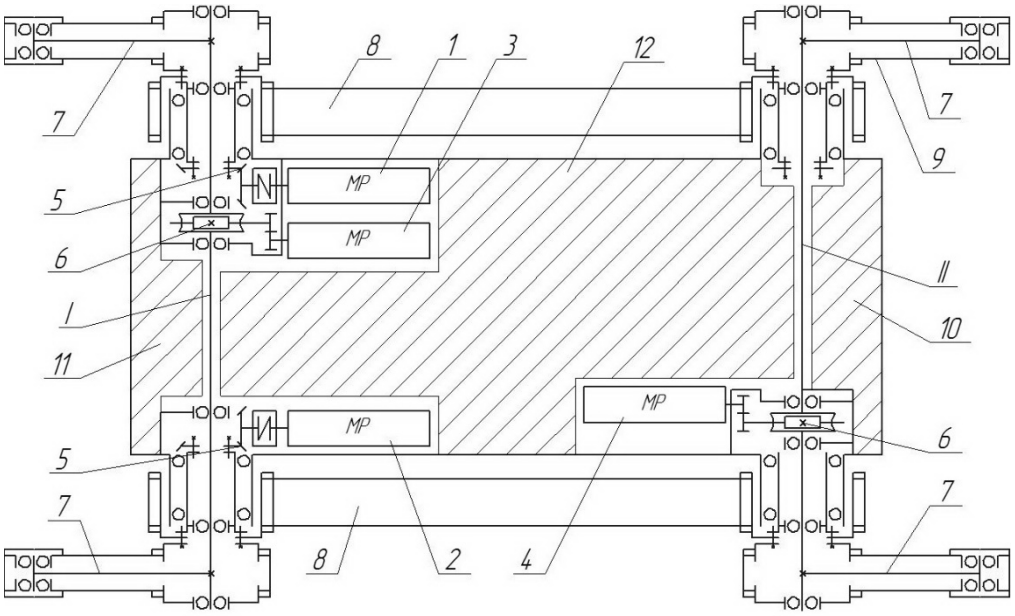


Рисунок 1 – Компоновка элементов конструкции шасси с перпендикулярным расположение приводов относительно оси ведущих колес

Мотор-редукторы 1 и 2 (МР) через конические передачи 5 приводят в движение маршевые гусеничные ленты 8. Гусеничные ленты 8 через элементы зубчатого зацепления приводят в движение вспомогательные гусеничные ленты 9, расположенные на рычагах 7 по соответствующим бортам. Мотор-редукторы 3 и 4 через червячные редукторы 6 вращают валы рычагов I и II. Пространство за торцевыми панелями 10 и 11, и центральное пространство 12 свободны для размещения оборудования.

На рисунке 1 МР, расположенные вдоль бортов, смещают центр масс ближе к центру робота и обеспечивают наличие свободного пространства за торцевыми панелями и в центральной части робота, в котором можно разместить функциональные блоки, такие как, аккумуляторный, блок сенсорики и т.п. Кроме того, при такой компоновке теплоотвод от нагруженных маршевых МР обеспечивается через боковые панели. Данная схема может реализовываться на базе конических передач для маршевых приводов и червячной для приводов рычагов, так и на базе гипоидных передач для всех приводов. При использование гипоидных передач возрастает КПД приводов, но возникает необходимость удержания положения рычагов из-за отсутствия самоторможения. В данной компоновке приводов используются классические схемы установки механических передач, что обеспечивает простоту конструкции.

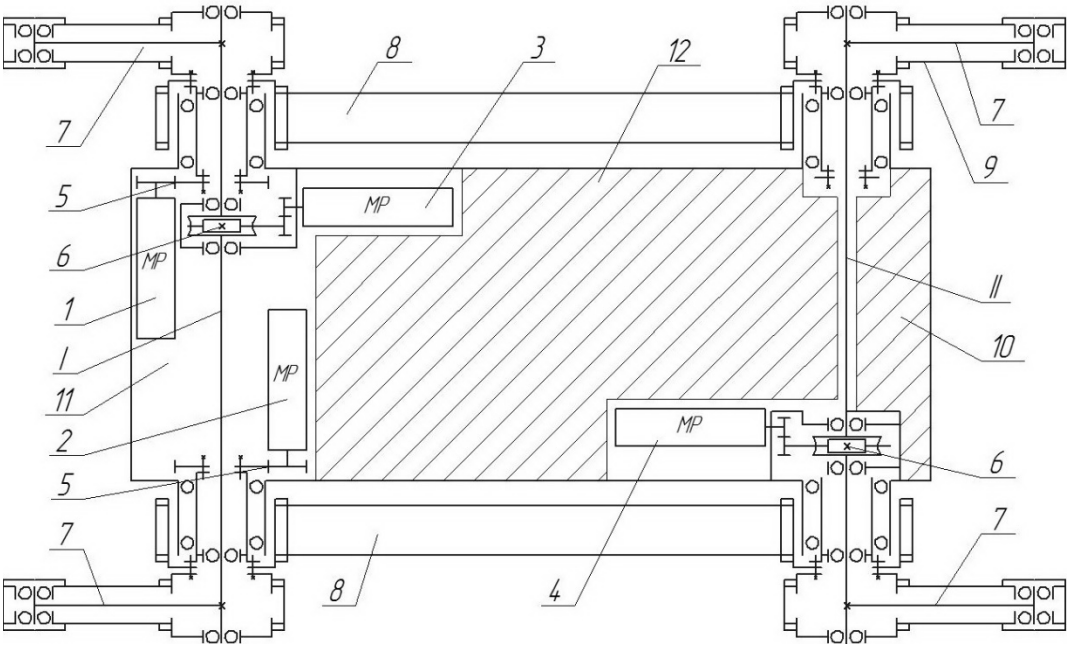


Рисунок 2 – Компоновка элементов конструкции шасси с параллельным расположение приводов относительно оси ведущих колес

Мотор-редукторы 1 и 2 (МР) через цилиндрические передачи 5 приводят в движение маршевые гусеничные ленты 8. Гусеничные ленты 8 через элементы зубчатого зацепления приводят в движение вспомогательные гусеничные ленты 9, расположенные на рычагах 7 по соответствующим бортам. Мотор-редукторы 3 и 4 через червячные приводы 6 вращают валы рычагов Iи II. Пространство за торцевой панелью 10, и центральное пространство 12 свободны для размещения оборудования.

На рисунке 2 маршевые МР расположены параллельно главной оси колес, что существенно смещает центр масс к приводной оси, а оси МР червячных приводов поворота рычагов расположены вдоль бортов. Такая компоновка позволяет, освободить одну из торцевых панелей для функциональных блоков и центральное пространство, в которое возможно установить сложное навесное оборудование ближе к пассивной оси, скомпенсировав смещение центр масс на приводную ось.

Вышеописанные компоновки внутреннего пространства робота целесообразно применять для роботов легкого и среднего классов с сложным навесным оборудованием. Выбор схемы компоновки приводов напрямую зависит от массогабаритных размеров шасси, вида и места расположения полезных нагрузок, применяемых совместно с роботом.

E.S. Briskin, I.P. Vershinina, Ya.V. Kalinin

ON ENERGY-EFFICIENT ALGORITHMS OF THE WALKING ROBOT TURNING

Volgograd State Technical University
dtm@vstu.ru

Abstract

The plane motion of multilegged walking robot turning is investigating. It poses the variational problem of determining the optimal movement of the robot and its propulsion by the criterion of minimum energy losses. We construct a functional, characterizing the energy losses in the drive motor. An example of the solution and analysis of laws of the robot movement and its propellers when turning.

Keywords: walking robot, plane motion, turning, loss of drive motors, variational problem, minimum energy loss.

1. Introduction

The problem of improving the energy efficient of walking machines and walking robots is one of the important problem in their development [1, 2, 3]. This is because the walking mover is unbalanced [4] and when it is transferred to a new position a significant portion of engine power expended in overcoming inertia forces [5]. It is known that power is proportional to the cube of speed [6]. Known and some methods of solving this problem: through the introduction of power recovery [7, 8], through the rejection of the uniform motion of walking robot centre of mass, but maintaining the average speed [9, 10]. However, in general case of plane motion, in particular when turning such problem was not raised and not resolved.

2. The statement of the problem

Walking robots with dual mechanisms of walking are considered. Walking machine "Vosminog" (fig. 1a) [11] with dual cycle walking mechanisms and walking robot "Ortonog" with dual rotary-orthogonal walking mechanism are relate to such modules. Developed capacity of such robots engines is distributed by control system in such a way as to provide directional translational motion and turning. The turn for machine "Vosminog" is due to the difference of left and right boards speeds and accompained by a sliding and slipping movers on the ground. For "Ortonog" (fig. 1b) [12] the turn is cinematically exact without sliding and slipping and is provided as the changing of movers speeds on the left and right boards, and the turning the walking plane of mover.

а) walking machine "Vosminog"

б) walking robot "Ortonog"

Figure 1 – Walking robots of Volgograd state technical university

For example, when turning the movers of right boards must have a speed more then left, and the time of their interaction τ with the ground is equal, the stride length S_r movers of right board must be more than left S_l. To reduce movers sliding on the ground may provided self-resetting of the mechanism walking plane. For example, for robot "Ortonog" it is described by the matrix of control. Limited to the study of the walking robot centre of mass on a circle o radius R (fig. 2) the link is established as for wheeled and tracked machines between the distance travelled by the body, centre of mass S_c, right S_r and left S_l boards and angle of the body rotate Θ

$$\begin{cases} S_r = S_c\left(1 + b / R\right), \\ S_l = S_c\left(1 - b / R\right), \\ \Theta = S_c / R, \end{cases} \tag{1}$$

where b is the width of the robot body.

The task of determining such laws of walking robot body motion $\xi_c = \xi_c(t)$ and laws of transfer movers of right $\xi_r = \xi_r(t)$ and left $\xi_l = \xi_l(t)$ boards, providing minimum of engine heat loss is formulated.

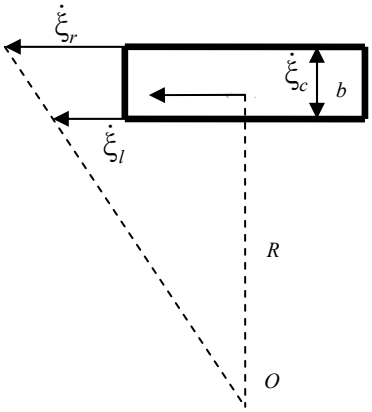


Figure 2 – The calculated rotation scheme of walking robot

3. Design scheme and mathematical model of motion dynamic

The motion equations of mechanical system with one common engine for all walking mechanisms included: differential equations of walking robot body plane motion, having mass M and moment of inertia with the respect of center of mass J and differential equations of straight motion of transferable walking mechanisms mass m each along of walking plane.

In this case we neglect the rotation of the planes of walking. Differential equations are supplemented by equations of holonomic links, which install dependencies between the angle of rotation engine shaft φ and coordinates ξ_c, ξ_{np}, ξ_n, Θ.

$$\begin{cases} \xi_c - \dfrac{\Pi_r(\varphi) + \Pi_l(\varphi)}{2} = 0, \\ \xi_r - \Pi_r^*(\varphi) = 0, \\ \xi_l - \Pi_l^*(\varphi) = 0, \\ \Theta - \dfrac{\Pi_r(\varphi) - \Pi_l(\varphi)}{b} = 0. \end{cases} \tag{2}$$

В (2) $\Pi_r^*(\varphi)$, $\Pi_l^*(\varphi)$, $\Pi_r(\varphi)$, $\Pi_l(\varphi)$ - are the transfer function for walking mechanisms in the transfer phase.

Thus the differential equations have a form

$$\begin{cases} M\ddot{\xi}_c = \lambda_c - Q, \\ m\ddot{\xi}_r = \lambda_r \dfrac{\partial \Pi_r^*(\varphi)}{\partial \varphi}, \\ m\ddot{\xi}_l = \lambda_l \dfrac{\partial \Pi_l^*(\varphi)}{\partial \varphi}, \\ J\ddot{\Theta} = \lambda_\Theta - M_C, \\ L - \lambda_c \dfrac{\partial\left(\Pi_r(\varphi) + \Pi_l(\varphi)\right)}{\partial \varphi} - \dfrac{\lambda_\Theta}{b}\dfrac{\partial\left(\Pi_r(\varphi) - \Pi_l(\varphi)\right)}{\partial \varphi} - \lambda_r \dfrac{\partial \Pi_r^*(\varphi)}{\partial \varphi} - \lambda_l \dfrac{\partial \Pi_l^*(\varphi)}{\partial \varphi}, \end{cases} \quad (3)$$

where Q, M_C- respectively resistance force, and moment of resistance force to rotation, λ_c, λ_Θ, λ_r, λ_l- undetermined Lagrange multipliers, L- developed torque of the driving motor. Last equation in (3) is the equation of the rotor of the driving motor during its rotation constant speed $\dot{\varphi} = \text{const}$.

4. Method of solution

The method of solving the problem is the requirement of a minimum of functionality

$$I = \int_0^\tau L^2 \mathrm{d}t, \quad (4)$$

which is proportional heat losses in the engine. The torque L, developed of the driving motor is determined from equation (3) with the consideration (2)

$$L = \frac{1}{\dot{\varphi}}\left[\left(M\ddot{\xi}_c + Q\right)\dot{\xi}_c + J\left(\ddot{\Theta} + M_C\right)\dot{\Theta} + m\ddot{\xi}_r\dot{\xi}_r + m\ddot{\xi}_l\dot{\xi}_l\right] = \frac{1}{\dot{\varphi}}\left[\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}t} + Q\dot{\xi}_c + M_C\dot{\Theta}\right], \quad (5)$$

where T is energy considered mechanical system

$$T = \frac{1}{2}M\dot{\xi}_c^2 + \frac{1}{2}J\dot{\Theta}^2 + \frac{1}{2}m\dot{\xi}_r^2 + \frac{1}{2}m\dot{\xi}_l^2. \quad (6)$$

However it is necessary to take into account the isoperimetric condition in determining minimum

$$\begin{aligned} &\int_0^\tau \dot{\xi}_c \mathrm{d}t = \frac{S_r + S_l}{2}, && \int_0^\tau \dot{\Theta}\mathrm{d}t = \frac{S_r + S_l}{2R}, \\ &\int_0^\tau \dot{\xi}_r \mathrm{d}t = 2S_r, && \int_0^\tau \dot{\xi}_l \mathrm{d}t = 2S_l. \end{aligned} \quad (7)$$

Thus the function under integral, providing minimum (4) changes

$$\Phi = L^2 + \mu_c\dot{\xi}_c + \mu_\Theta\dot{\Theta} + \mu_r\dot{\xi}_r + \mu_l\dot{\xi}_l,$$

where μ_c, μ_Θ, μ_r, μ_l- undetermined Lagrange multipliers.

Thus Euler's equations have a form

$$\begin{cases} 2\left(\ddot{T} + Q\ddot{\xi}_c + M_C\ddot{\Theta}\right)M\dot{\xi}_c - 2Q\left(\dot{T} + Q\dot{\xi}_c + M_C\dot{\Theta}\right) = \mu_c, \\ 2\left(\ddot{T} + Q\ddot{\xi}_c + M_C\ddot{\Theta}\right)J\dot{\Theta} - 2M_C\left(\dot{T} + Q\dot{\xi}_c + M_C\dot{\Theta}\right) = \mu_\Theta, \\ 2\left(\ddot{T} + Q\ddot{\xi}_c + M_C\ddot{\Theta}\right)m\dot{\xi}_r = \mu_r, \\ 2\left(\ddot{T} + Q\ddot{\xi}_c + M_C\ddot{\Theta}\right)m\dot{\xi}_l = \mu_l. \end{cases} \quad (8)$$

The equations may be simplified if we take into account that all Lagrange multipliers are constants, and $\dot{\xi}_r, \dot{\xi}_l$ at the beginning and at the end of each cycle of interaction with the support surface τ are equal to zero. Thus

$$\mu_r = \mu_l = 0 \Rightarrow \ddot{T} + Q\ddot{\xi}_c + M_C\ddot{\Theta} = 0, \quad (9)$$

And therefore

$$\dot{T} + Q\dot{\xi}_c + M_C\dot{\Theta} = C = \text{const}. \quad (10)$$

In order to determinate C it is sufficient to integrate (10) in the range of $0<t<\tau$.

Then take into account

$$I = \int_0^{\tau} \dot{T} \mathrm{d}t = 0, \tag{11}$$

and in the case of small angles of rotation Θ we obtain

$$Q\frac{S_r + S_l}{2} + M_C \frac{S_r - S_l}{b} = QV_a\tau + M_C \frac{V_a}{R}\tau = C\tau, \tag{12}$$

where V_a – average speed of robot body

$$C = \left(Q + \frac{M_C}{R}\right)V_a. \tag{13}$$

Whence

$$\dot{T} + \left(Q + \frac{M_C}{R}\right)\dot{\xi}_c = \left(Q + \frac{M_C}{R}\right)V_a. \tag{14}$$

In the particular case $M_C/R = 0$ the equation (14) complies with equation previously obtained [10, 14], but the difference (14) is in the fact that contains three unknown functions instead two: $\xi_c(t)$, $\xi_r(t)$, $\xi_l(t)$. This equation (14) in expanded form is

$$\left(M + \frac{J}{R^2}\right)\dot{\xi}_c\ddot{\xi}_c + m\dot{\xi}_r\ddot{\xi}_r + m\dot{\xi}_l\ddot{\xi}_l + \left(Q + \frac{M_C}{R}\right)\dot{\xi}_c = \left(Q + \frac{M_C}{R}\right)V_a. \tag{15}$$

The unknown functions $\xi_c(t)$, $\xi_r(t)$, $\xi_l(t)$ satisfy the conditions:

$$\begin{gathered}\xi_c(0) = 0; \xi_r(0) = 0; \xi_l(0) = 0; \dot{\xi}_c(0) = V_0; \dot{\xi}_r(0) = 0; \dot{\xi}_l(0) = 0; \\ \xi_c(\tau) = S; \xi_r(\tau) = S\left(1 + \frac{b}{R}\right); \xi_l(\tau) = S\left(1 - \frac{b}{R}\right); \dot{\xi}_c(\tau) = V_0; \dot{\xi}_r(\tau) = 0; \dot{\xi}_l(\tau) = 0.\end{gathered} \tag{16}$$

For the solution of the equation (15) can be used different methods.

1. The method of defining two arbitrary function $\xi_r(t)$, $\xi_l(t)$, satisfy the conditions (16) and subsequent solution nonlinear differential equation

$$\left(M + \frac{J}{R^2}\right)\dot{\xi}_c\ddot{\xi}_c + \left(Q + \frac{M_C}{R}\right)\dot{\xi}_c = \left(Q + \frac{M_C}{R}\right)V_a - m\dot{\xi}_r\ddot{\xi}_r - m\dot{\xi}_l\ddot{\xi}_l. \tag{17}$$

2. The way to specify the motion of center of mass of a body $\xi_c = \xi_c(t)$ and subsequent definition of the left and right board. In this case we obtain the following equation

$$\left(1 + k^2\right)\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\dot{\xi}_r^2 = \left(Q + \frac{M_C}{R}\right)V_a - \left(M + \frac{J}{R^2}\right)\dot{\xi}_c\ddot{\xi}_c - \left(Q + \frac{M_C}{R}\right)\dot{\xi}_c, \tag{18}$$

where $k = \xi_l(t)/\xi_r(t) = \text{const}$.

3. The method of supplement of equation (15) two additional terms, for example, defined in the forms of functionals

$$\begin{cases} I_1 = \int_0^{\tau} \ddot{\xi}_r^2 \mathrm{d}t \to \min, \\ I_2 = \int_0^{\tau} \ddot{\xi}_l^2 \mathrm{d}t \to \min. \end{cases} \tag{19}$$

After that we can make two additional Euler equations and to attach their to equation (15). The laws of motion, obtained by applying the first method are presented in fig. 3 and 4.

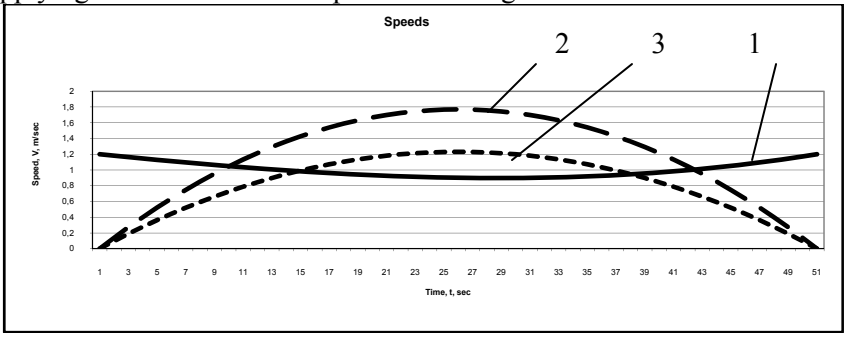


Figure 3 – Speeds of body (1), right (2) and left(3) movers of walking robot

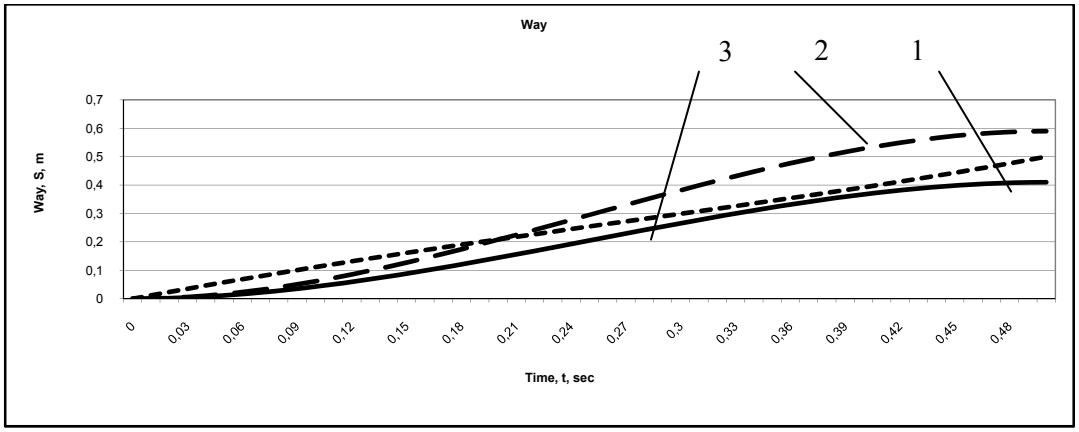


Figure 4 – Ways of body (1), right (2) and left (3) movers of walking robot

Conclusion

The differential equations of walking robot motion when turning providing energy optimal regime have been obtained. Different ways to select these regimes have been proposed.

1. Ohocimsky, D.E. Schagayuschie maschiny [Walking machines] / D.E. Ohocimsky, A.K. Platonov, A.A. Kiril'chenko, V.V. Lapshin // Preprinty IPM im. M.V. Keldysch AN USSR [Preprints of Keldysch institute RAS], 1989, - 36 c.
2. Briskin, E.S. Sravnitel'nyi analiz kolesnyh, gusenichnyh b schagayuschih maschin [Comparative analysis wheeled, tracked and walking machines] / E.S. Briskin, V.V. Chernyshev, A.V. Maloletov, N.G. Scharonov // Robototehnika i tehnicheskaya kibernetika [Robototechnics and technical cybernetics]. 2013. № 1(1). -C. 6-14.
3. Briskin, E.S. Control of motion of a legged locomotion machine with minimal power motor / E.S. Briskin, V.V. Zhoga, A.V. Maloletov // Mechanic of Solids. 2010. № 44 (6). - pp. 828-836.DOI: 10.3103/S002565440906003X
4. Six Link Mechanisms for the Legs of Walking Machines / Bessonov A.P., Umnov N.V., Korenovsky V.V. and other // Theory and Practice of Robots and Manipulators. ROMANSY 13: Proc. of the 13-th CISM-IFToMM Symp., Zakopane, Poland, 2000. P.347-354.
5. Ohocimsky, D.E. Energetika dvizheniya shestinogogo schagayuschego [Energy of motion of sixlegged walking apparatus] / D.E. Ohocimsky, A.K. Platonov, V.V. Lapshin // Izvestia RAS. Teoriya i sistemy upravleniya. [News of RAS. Theory and systems of control]. 1976. №5. -C. 42.
6. Lapshin, V.V. Modelnye ocenki energozatrat schagayuschego apparata [Model estimates of energy walking machine] / V.V. Lapshin // Izvestia RAS, MTT [New of RAS. Mechanic of solid body]. № 1, 1993 -C. 65-74.
7. Lapshin, V.V. Ободномспособерекуперацииэнергиипридвижениишагающегоаппарата / V.V. Lapshin, D.E. Ohocimsky, A.K. Platonov // Izvestia RAS, MTT [New of RAS. Mechanic of solid body]. № 5, 1986 – C. 67-71.
8. Goncharov, S.I. Analiz dinamiki periodicheskoi raboty dvigatelei schagayuschih maschin s cel'yu uvelicheniya ih bystrodeistviya [Analysis of the dynamics of periodic work of walking machines engines in order to increase their speed] / S.I. Goncharov // Diss. kand. tehn. nauk. Institute of machinery RAS USSR. 1989.
9. Beleckiy, V.V. Dvunogaya hod'ba: model'nye zadachi dinamiki i upravleniya. [Biped walking: modeling problems of dynamics and control] / V.V. Beleckiy // M.: Наука, 1984. - 288 c.
10. Briskin, E.S. On energetically efficient algorithms of walking machines with cyclic drives / E.S. Briskin, Ya.V. Kalinin // Journal of Computer and Systems Sciences International, 2011, №50 (2), pp. 348-354. DOI: 10.1134/S1064230711020043.
11. Briskin, E.C. Schagayuschaya maschina "Vosminog" [Walking machine "Vosminog"] / E.C. Briskin, V.V. Chernyschev, A.V. Maloletov and others // Mehatronika, avtomatizaciya, upravlenie [Mechatronics, Automatization, Control]. 2004. №5. – C. 48-49.
12. Briskin, E.S. On the control of motion of a walking machine with twin orthogonal rotatory movers / E.S. Briskin, I.P. Vershinina, A.V. Maloletov, N.G. Scharonov // Journal of Computer and Systems Sciences International, 2014, №53 (3), pp. 464-471. DOI: 10.1134/S1064230714020038
13. Chudakov, D.A. Osnovy teorii i rascheta traktora i avtomobilya [Fundamentals of the theory and calculation of the tractor and the vehicle]. M.: Kolos, 1972. 384 c.205;

14. Briskin, E.S. On the energy efficiency of cyclic mechanisms / E.S. Briskin, Ya.V. Kalinin, A.V. Maloletov, V.V. Chernyschev // Mechanic of Solids. 2014. № 49 (1). - pp. 11-17. DOI: 10.3103/S0025654414010026

Е.С. Брискин, И.П. Вершинина, Я.В. Калинин

ОБ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИ ЭФФЕКТИВНЫХ АЛГОРИТМАХ ПОВОРОТА ШАГАЮЩИХ РОБОТОВ С ДВИЖИТЕЛЯМИ НА ОСНОВЕ СДВОЕННЫХ МЕХАНИЗМОВ ШАГАНИЯ

Волгоградский государственный технический университет
dtm@vstu.ru

Аннотация

Рассматривается плоское движение многоногого шагающего робота при повороте. Ставится вариационная задача определения оптимального движения робота и его движителей по критерию минимума энергозатрат. Строится функционал, характеризующий потери энергии в приводном двигателе. Приведён пример решения и анализ построения законов движения робота и его движителей при повороте.

Ключевые слова: шагающий робот, плоское движение, поворот, потери в приводных двигателях, вариационная задача, минимум потерь энергии.

Введение

Задача повышения энергетической эффективности шагающих роботов является одной из важнейших при их разработке и эксплуатации [1, 2, 3]. Обусловлено это тем, что шагающий движитель является неуравновешенным механизмом [4] и при его периодическом переносе в новое положение значительная часть мощности двигателя расходуется на преодоление сил инерции [5]. Известно, что эта мощность при поступательном движении пропорциональна кубу скорости корпуса робота [6]. Известны и некоторые методы решения этой задачи: за счёт введения рекуператоров энергии [7, 8], за счёт отказа от равномерного движения центра масс корпуса робота при сохранении средней скорости [9, 10].

Однако, в общем случае плоского движения, в частности при повороте, такая задача не ставилась и не решалась.

Постановка задачи

Рассматриваются шагающие роботы со сдвоенными механизмами шагания. Такие механизмы шагания за счёт своей кинематической схемы или управления ими обеспечивают постоянное нахождение в опоре одного из механизмов, в то время как другой механизм находится в переносе. Таким образом, обеспечивается коэффициент режима механизма шагания γ равный 0,5. К таким роботам, в частности, относятся шагающая машина «Восьминог» (рис. 1а) [11], в которой использовались сдвоенные цикловые механизмы шагания Чебышева-Умнова и шагающий робот «Ортоног» (рис. 1б) [12] со сдвоенными ортогонально-поворотными движителями.

а) шагающая машина «Восьминог» б) шагающий робот «Ортоног»

Рисунок 1 – Шагающие роботы Волгоградского государственного технического университета

Развиваемая энергетической установкой мощность в этих роботах распределяется системой управления таким образом, чтобы обеспечить как курсовое поступательно движение, так и поворот. Для шагающей машины «Восьминог» поворот осуществляется за счёт разницы скоростей левого и

правого борта и сопровождается скольжением и буксованием стоп движителя на грунте. Для шагающего робота «Ортоног» поворот является кинематически точным, т.е. без скольжения и буксования стоп движителей и обеспечивается как изменением скоростей на движителях левого и правого борта, так и поворотом плоскостей механизмов шагания относительно корпуса робота. Так, при повороте налево, движители правого борта должны двигаться быстрее, чем левого. В таком случае при одинаковом времени нахождения их фазе опоры τ, а следовательно и в фазе переноса, это означает, что длина шага движителей правого борта $S_{пр}$ должна быть больше длины шага $S_{л}$ движителей левого. Для снижения проскальзывания стоп движителей по опорной поверхности может быть предусмотрена самоустановка плоскостей механизмов шагания, что, например, для робота «Ортоног» описывается матрицей управления [12]. Ограничиваясь изучением стационарного режима движения центра масс корпуса робота по окружности радиуса R (рис. 2) с постоянной средней скоростью, устанавливается как и для колёсных и гусеничных машин [13] связь между расстоянием, пройденным центром масс корпуса за время одного шага S_c, правым $S_{пр}$, левым $S_{л}$ бортами и углом поворота Θ корпуса (при повороте налево)

$$\begin{cases} S_{пр} = S_c\left(1 + b/R\right), \\ S_{лев} = S_c\left(1 - b/R\right), \\ \Theta = S_c / R, \end{cases} \tag{1}$$

где b- ширина корпуса шагающего робота, R- радиус поворота.

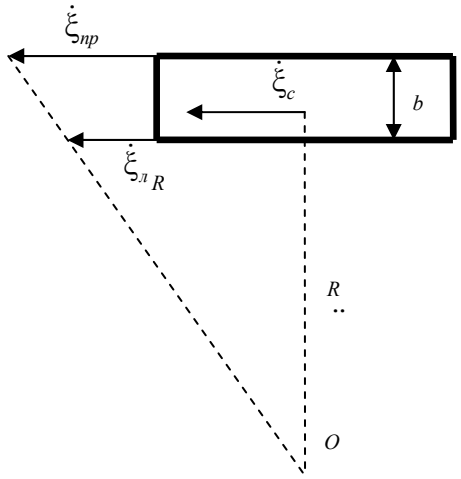


Рисунок 2 – Расчётная схема поворота шагающего робота

Ставится задача определения таких законов движения корпуса шагающего робота $\xi_c = \xi_c(t)$ и законов переноса движителей правого $\xi_{пр} = \xi_{пр}(t)$ и левого $\xi_{л} = \xi_{л}(t)$ бортов, которые обеспечат минимум тепловых потерь в приводном двигателе, мощность которого распределяется на реализацию требуемого движения корпуса и переноса движителей левого и правого бортов.

Расчётная схема и математическая модель динамики движения при повороте

Уравнения движения изучаемой механической системы, имеющей один общий привод для механизмов шагания как находящихся в опорной фазе, так и в фазе переноса, включают в себя: дифференциальные уравнения плоского движения корпуса робота, имеющего массу M и момент инерции J относительно оси, проходящей в плане через центр масс; дифференциального уравнения прямолинейного, вдоль плоскостей шагания, переносимых механизмов шагания массы m каждый. При этом поворотом плоскостей шагания относительно корпуса робота пренебрегается. Дифференциальные уравнения движения дополняются уравнениями голономных связей, устанавливающих зависимости между углами поворота ведущего вала двигателя φ и координатами ξ_c, $\xi_{пр}$, $\xi_{л}$, Θ.

$$\begin{cases} \xi_c - \dfrac{\Pi_{пр}(\varphi) + \Pi_{л}(\varphi)}{2} = 0, \\ \xi_{пр} - \Pi^*_{пр}(\varphi) = 0, \\ \xi_{л} - \Pi^*_{л}(\varphi) = 0, \\ \Theta - \dfrac{\Pi_{пр}(\varphi) - \Pi_{л}(\varphi)}{b} = 0. \end{cases} \quad (2)$$

В (2) $\Pi^*_{пр}(\varphi)$, $\Pi^*_{лев}(\varphi)$, $\Pi_{пр}(\varphi)$, $\Pi_{лев}(\varphi)$ - передаточные функции для механизмов шагания, находящихся в фазе взаимодействия с опорной поверхностью и в фазе переноса соответственно, обеспечиваемые или механическими передачами или системами управления.

Тогда дифференциальные уравнения движения имеют вид

$$\begin{cases} M\ddot{\xi}_c = \lambda_c - Q, \\ m\ddot{\xi}_{пр} = \lambda_{пр} \dfrac{\partial \Pi^*_{пр}(\varphi)}{\partial \varphi}, \\ m\ddot{\xi}_{л} = \lambda_{л} \dfrac{\partial \Pi^*_{л}(\varphi)}{\partial \varphi}, \\ J\ddot{\Theta} = \lambda_{\Theta} - M_C, \\ L - \lambda_c \dfrac{\partial\left(\Pi_{пр}(\varphi) + \Pi_{л}(\varphi)\right)}{\partial \varphi} - \dfrac{\lambda_{\Theta}}{b} \dfrac{\partial\left(\Pi_{пр}(\varphi) - \Pi_{л}(\varphi)\right)}{\partial \varphi} - \lambda_{пр} \dfrac{\partial \Pi^*_{пр}(\varphi)}{\partial \varphi} - \lambda_{л} \dfrac{\partial \Pi^*_{л}(\varphi)}{\partial \varphi}, \end{cases} \quad (3)$$

где Q, M_C- сила и момент силы сопротивления движению, λ_c, λ_Θ, $\lambda_{пр}$, $\lambda_л$- неопределённые множители Лагранжа, L- момент, развиваемый приводным двигателем курсового движения. Последнее уравнение (3) - это уравнение ротора приводного двигателя при его вращении с постоянной угловой скоростью $\dot{\varphi} = \text{const}$.

Метод решения

В основе метода решения поставленной задачи лежит требование минимума функционала

$$I = \int_0^{\tau} L^2 \mathrm{d}t, \quad (4)$$

который пропорционален тепловым потерям двигателя за время одного шага τ. Момент L, развиваемый приводным двигателем определяется из (3) с учётом (2)

$$L = \frac{1}{\dot{\varphi}}\left[\left(M\ddot{\xi}_c + Q\right)\dot{\xi}_c + J\left(\ddot{\Theta} + M_C\right)\dot{\Theta} + m\ddot{\xi}_{пр}\dot{\xi}_{пр} + m\ddot{\xi}_{л}\dot{\xi}_{л}\right] = \frac{1}{\dot{\varphi}}\left[\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}t} + Q\dot{\xi}_c + M_C\dot{\Theta}\right], \quad (5)$$

где T- кинетическая энергия рассматриваемой механической системы

$$T = \frac{1}{2}M\dot{\xi}_c^2 + \frac{1}{2}J\dot{\Theta}^2 + \frac{1}{2}m\dot{\xi}_{пр}^2 + \frac{1}{2}m\dot{\xi}_{л}^2. \quad (6)$$

Однако, при определении минимума (4) необходимо учитывать изопериметрические условия. Для сдвоенных движителей эти условия имеют вид

$$\begin{aligned} &\int_0^{\tau} \dot{\xi}_c \mathrm{d}t = \frac{S_{пр} + S_{л}}{2}, && \int_0^{\tau} \dot{\Theta} \mathrm{d}t = \frac{S_{пр} + S_{л}}{2R}, \\ &\int_0^{\tau} \dot{\xi}_{пр} \mathrm{d}t = 2S_{пр}, && \int_0^{\tau} \dot{\xi}_{л} \mathrm{d}t = 2S_{л}. \end{aligned} \quad (7)$$

Тогда подынтегральная функция, обеспечивающая минимум (4), изменяется

$$\Phi = L^2 + \mu_c\dot{\xi}_c + \mu_\Theta\dot{\Theta} + \mu_{пр}\dot{\xi}_{пр} + \mu_{л}\dot{\xi}_{л},$$

где μ_c, μ_Θ, $\mu_{пр}$, $\mu_л$- неопределённые множители Лагранжа.

Тогда уравнения Эйлера имеют вид

$$\begin{cases} 2\left(\ddot{T}+Q\ddot{\xi}_c+M_C\ddot{\Theta}\right)M\dot{\xi}_c-2Q\left(\dot{T}+Q\dot{\xi}_c+M_C\dot{\Theta}\right)=\mu_c, \\ 2\left(\ddot{T}+Q\ddot{\xi}_c+M_C\ddot{\Theta}\right)J\dot{\Theta}-2M_C\left(\dot{T}+Q\dot{\xi}_c+M_C\dot{\Theta}\right)=\mu_\Theta, \\ 2\left(\ddot{T}+Q\ddot{\xi}_c+M_C\ddot{\Theta}\right)m\dot{\xi}_{пр}=\mu_{пр}, \\ 2\left(\ddot{T}+Q\ddot{\xi}_c+M_C\ddot{\Theta}\right)m\dot{\xi}_{л}=\mu_{л}. \end{cases} \tag{8}$$

Система уравнений (8) допускает упрощение, если учесть, что решается изопериметрическая задача и все множители Лагранжа являются постоянными. Так как в пределах промежутка времени τ $\dot{\xi}_{пр}, \dot{\xi}_{л}$ для исследуемого режима движения в начале и в конце взаимодействия с опорной поверхностью равны нулю, то

$$\mu_{пр}=\mu_{л}=0\Rightarrow\ddot{T}+Q\ddot{\xi}_c+M_C\ddot{\Theta}=0, \tag{9}$$

и, следовательно, существует первый интеграл

$$\dot{T}+Q\dot{\xi}_c+M_C\dot{\Theta}=C=\text{const}. \tag{10}$$

Для определения постоянной C достаточно проинтегрировать (10) в пределах $0<t<\tau$.

Тогда, учитывая, что рассматривается стационарное движение, с постоянной средней скоростью центра масс

$$I=\int_0^\tau\dot{T}\mathrm{d}t=0, \tag{11}$$

при малых углах поворота Θ получаем

$$Q\frac{S_{пр}+S_{л}}{2}+M_C\frac{S_{пр}-S_{л}}{b}=QV_{ср}\tau+M_C\frac{V_{ср}}{R}\tau=C\tau, \tag{12}$$

где $V_{ср}$ – средняя скорость движения. Отсюда

$$C=\left(Q+\frac{M_C}{R}\right)V_{ср}. \tag{13}$$

Таким образом, необходимым условием, обеспечения минимума тепловых потерь двигателя курсового перемещения, является выполнение условия

$$\dot{T}+\left(Q+\frac{M_C}{R}\right)\dot{\xi}_c=\left(Q+\frac{M_C}{R}\right)V_{ср}. \tag{14}$$

Уравнение (14) в частном случае при $M_C/R = 0$ совпадает с ранее полученными результатами [10, 14], а отличие уравнения (14) состоит в том, что оно содержит вместо двух три неизвестные функции $\xi_c(t)$, $\xi_{пр}(t)$, $\xi_{л}(t)$. В развёрнутой форме (14) имеет вид

$$\left(M+\frac{J}{R^2}\right)\dot{\xi}_c\ddot{\xi}_c+m\dot{\xi}_{пр}\ddot{\xi}_{пр}+m\dot{\xi}_{л}\ddot{\xi}_{л}+\left(Q+\frac{M_C}{R}\right)\dot{\xi}_c=\left(Q+\frac{M_C}{R}\right)V_{ср}. \tag{15}$$

Искомые функции $\xi_c(t)$, $\xi_{пр}(t)$, $\xi_{л}(t)$ должны удовлетворять граничным условиям

$$\begin{gathered} \xi_c(0)=0;\xi_{пр}(0)=0;\xi_{л}(0)=0;\dot{\xi}_c(0)=V_0;\dot{\xi}_{пр}(0)=0;\dot{\xi}_{л}(0)=0; \\ \xi_c(\tau)=S;\xi_{пр}(\tau)=S\left(1+\frac{b}{R}\right);\xi_{л}(\tau)=S\left(1-\frac{b}{R}\right);\dot{\xi}_c(\tau)=V_0;\dot{\xi}_{пр}(\tau)=0;\dot{\xi}_{л}(\tau)=0. \end{gathered} \tag{16}$$

Для разрешения уравнения (15), содержащего три неизвестные функции могут быть использованы различные методы:

1) Метод задания двух функций $\xi_{пр}(t)$, $\xi_{л}(t)$ произвольным образом, так, чтобы выполнялись условия (16) с последующим решением нелинейного дифференциального уравнения вида

$$\left(M+\frac{J}{R^2}\right)\dot{\xi}_c\ddot{\xi}_c+\left(Q+\frac{M_C}{R}\right)\dot{\xi}_c=\left(Q+\frac{M_C}{R}\right)V_{ср}-m\dot{\xi}_{пр}\ddot{\xi}_{пр}-m\dot{\xi}_{л}\ddot{\xi}_{л}. \tag{17}$$

2) Метод задания равнопеременного $\xi_c = \xi_c(t)$ и последующего определения движения левого и правого бортов. Также необходимо, например, задание постоянного соотношения между скоростями правого и левого борта $\xi_{пр}(t)$, $\xi_{л}(t)$. Тогда из (15) получается следующее уравнение

$$\left(1+k^2\right)\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\dot{\xi}_{np}^2=\left(Q+\frac{M_C}{R}\right)V_{cp}-\left(M+\frac{J}{R^2}\right)\dot{\xi}_c\ddot{\xi}_c-\left(Q+\frac{M_C}{R}\right)\dot{\xi}_c, \tag{18}$$

где $k=\xi_л(t)/\xi_{пр}(t)$ - постоянный коэффициент пропорциональности, принятый постоянным.

Такой метод использовался в работе [10].

3) Метод применения уравнения (15) с привлечением двух дополнительных условий, накладываемых на законы движения корпуса робота и переносимых движителей.

Например, можно дополнительно потребовать, чтобы обеспечивался минимум среднеквадратичных ускорений механизмов левого и правого бортов

$$\begin{cases} I_1=\int\limits_0^{\tau}\ddot{\xi}_{np}^2\mathrm{d}t\to\min, \\ I_2=\int\limits_0^{\tau}\ddot{\xi}_{л}^2\mathrm{d}t\to\min. \end{cases} \tag{19}$$

Отсюда составляются два дополнительных уравнения Эйлера и присоединяются к уравнению (15). Законы движения, полученные с применением первого данного метода, представлены на рис. 3 и 4 для набора значений параметров шагающего робота, соответствующих шагающему роботу «Ортоног».

Также могут быть выдвинуты требования увеличения длины шага, повышения средней скорости движения и т.д.

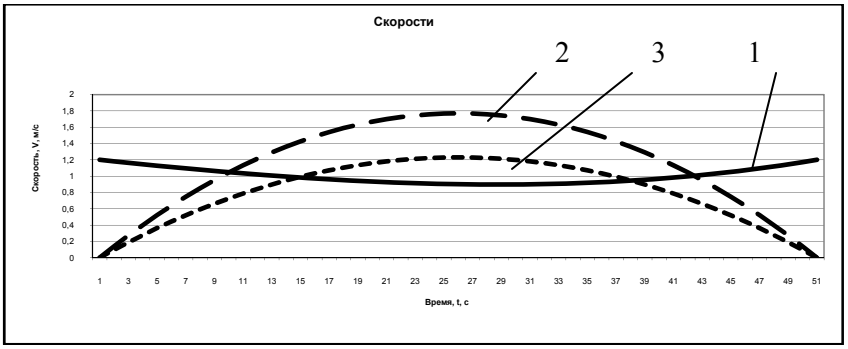


Рисунок 3 – Скорости корпуса (1), движителей правого (2) и левого (3) бортов при повороте

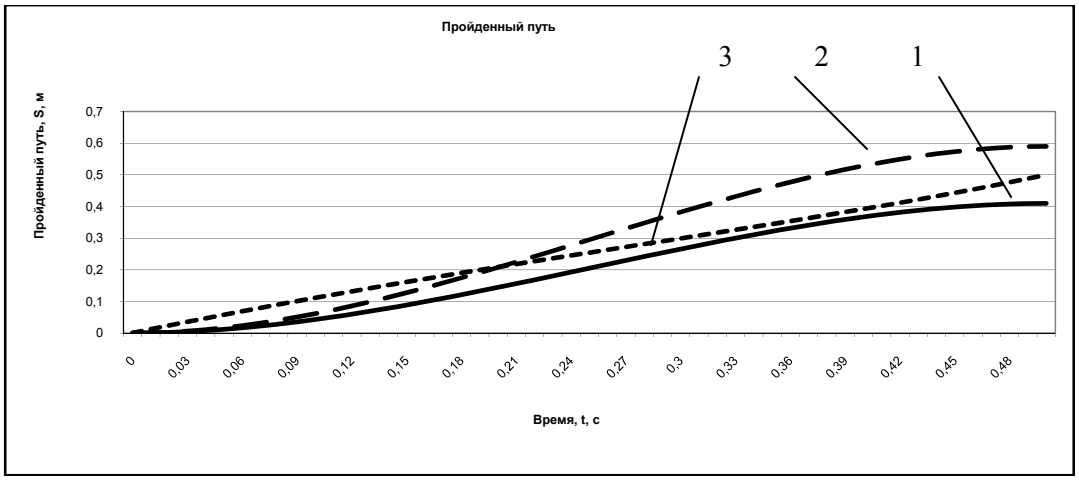


Рисунок 4 – Пути, пройденные корпусом (1), движителями правого (2) и левого (3) бортов при повороте

Выводы

Получены дифференциальные уравнения движения для шагающего робота и его переносимых движителей, обеспечивающие при повороте энергетически оптимальный с точки зрения минимизации тепловых потерь режим. Предложены различные методы выбора таких режимов.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ – проект 16-31-60042 мол_а_дк

1. Охоцимский, Д.Е. Шагающие машины. / Д.Е. Охоцимский, А.К. Платонов, А.А. Кирильченко, В.В. Лапшин // Препринты ИПМ им.М.В.Келдыша АН СССР, 1989, - 36 с.

2. Брискин, Е.С. Сравнительный анализ колесных, гусеничных и шагающих машин / Е.С. Брискин, В.В. Чернышев, А.В. Малолетов, Н.Г. Шаронов // Робототехника и техническая кибернетика. 2013. № 1(1). - С. 6-14.
3. Брискин, Е.С. Об управлении движением шагающей машины с двигателем минимальной мощности / Е.С. Брискин, В.В. Жога, А.В. Малолетов // Известия РАН. Механикатвердоготела. 2009. №6. -С. 21-30.
4. Six Link Mechanisms for the Legs of Walking Machines / Bessonov A.P., Umnov N.V., Korenovsky V.V. and other // Theory and Practice of Robots and Manipulators. ROMANSY 13: Proc. of the 13-th CISM-IFToMM Symp., Zakopane, Poland, 2000. P.347-354.
5. Охоцимский, Д.Е. Энергетика движения шестиногого шагающего аппарата / Д.Е. Охоцимский, А.К. Платонов, В.В. Лапшин // Известия РАН. Теория и системы управления. 1976. №5. - С. 42.
6. Лапшин, В.В. Модельные оценки энергозатрат шагающего аппарата / В.В. Лапшин // Известия РАН, МТТ. № 1, 1993 - С. 65-74.
7. Лапшин, В.В. Об одном способе рекуперации энергии при движении шагающего аппарата / В.В. Лапшин, Д.Е. Охоцимский, А.К. Платонов // Известия АН СССР, МТТ. № 5, 1986 – С. 67-71.
8. Гончаров, С.И. Анализ динамики периодической работы двигателей шагающих машин с целью увеличения их быстродействия / С.И. Гончаров // Дисс. канд. техн. наук. Ин-т машиноведения АН СССР. 1989.
9. Белецкий, В.В. Двуногая ходьба: модельные задачи динамики и управления. / В.В. Белецкий // М.: Наука, 1984. - 288 с.
10. Брискин, Е.С. Об энергетически эффективных алгоритмах двжиения шагающих машин с цикловыми движителями / Е.С. Брискин, Я.В. Калинин // Известия РАН. Теория и системы управления. 2011. №2. - С. 170-176.
11. Брискин, Е.С. Шагающая машина «Восьминог» / Е.С. Брискин, В.В. Чернышев, А.В. Малолетов и др. // Мехатроника, автоматизация, управление. 2004. №5. – С. 48-49.
12. Брискин, Е.С. Об управлении движением шагающей машины со сдвоенными ортогонально-поворотными движителями / Е.С. Брискин, И.П. Вершинина, А.В. Малолетов, Н.Г. Шаронов // Известия РАН. Теория и системы управления. 2014. №3. - С. 168.
13. Чудаков Д.А. Основы теории и расчёта трактора и автомобиля. М.: Колос, 1972. 384 -с.205;
14. Брискин, Е.С. Об энергетической эффективности цикловых механизмов / Е.С. Брискин, Я.В. Калинин, А.В. Малолетов, В.В. Чернышев // Известия РАН. Механика твердого тела. 2014. №1. - С. 18-25.

V. Muliukha, M. Guk, V. Zaborovsky

NETWORK-CENTRIC SUPERVISORY CONTROL SYSTEM FOR ROBOTICS

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
vladimir@mail.neva.ru

Abstract

In recent years, the most promising researches in the robotics focuses on applied problems of robots' group control. One of the modern methods for the organization of such control systems is a network-centric approach that allows to combine centralized and decentralized control system. This paper is focused on the the mobile robot control system, which is developed within the applied research in SPbPU.

Keywords: network-centric approach, group control, cloud robotics, navigation.

В.А. Мулюха, М.Ю. Гук, В.С. Заборовский

СИСТЕМА СУПЕРВИЗОРНОГО СЕТЕЦЕНТРИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ

СПбПУ Петра Великого, Санкт-Петербург
vladimir@mail.neva.ru

Аннотация

В последние годы наиболее перспективные работы в области робототехники концентрируется на прикладных задачах, связанных в первую очередь с организацией управления группой роботов. Одним из современных методов организации таких систем управления является сетецентрический подход, позволяющий комбинировать централизованную и децентрализованную системы управления. В работе

рассматривается система управления мобильным роботом, разрабатываемая в рамках прикладных научных исследований в СПбПУ.

Ключевые слова: сетецентрический подход, групповое управление, облачная робототехника, навигация.

Введение

Приоритетным направлением развития науки и техники Российской Федерации на период до 2030 года являются информационно-телекоммуникационные технологии, составляющие основу современной национальной платформы суперкомпьютерного инженеринга. Эффективность применения такой платформы обеспечивается использованием технологий облачных вычислений, сервисы которых реализуются на базе гетерогенных вычислительных систем, позволяющих эффективно решать актуальные научно-технические проблемы, включая управление робототехническими объектами, проведение предсказательного моделирования и обеспечение информационной безопасности.

В последние годы наиболее перспективные работы в области робототехники концентрируется на прикладных задачах, связанных в первую очередь с организацией управления группой роботов. Повышение эффективности работы средств робототехнического обеспечения возможно в первую очередь за счет автоматизации сложных операций и согласованного выполнения комбинированных действий одновременно несколькими роботами в режимах автономного и супервизорного управления.

Основная идея применения облачных технологий в робототехнике базируется на парадигме цифровой физики (it from bit) [1], подразумевающей, что вся воспринимаемая роботами вселенная является измеримой и вычислимой. Если объект физического мира не может быть преобразован в информационное сообщение от датчика – для робота и его системы управления такого объекта просто не существует. Таким образом, переработка информации, полученной от датчиков, в команды для исполнительных устройств является ключевой функцией робота. При этом, выполнение такой обработки не обязательно должно быть локальным. Для целого ряда задач, функционирование которых осуществляется не в режиме реального времени, обработка полученной информации может осуществляться удаленно в облачной среде. Это позволяет снизить вычислительную нагрузку на каждого робота в группе и повышает эффективность работы всех киберфизических объектов за счет увеличения длительности их работы без подзарядки и снижения избыточности характеристик каждого из роботов относительно выполняемых им задач

Работы в области применения облачных технологий в робототехнике являются актуальными и особенно активно ведутся в последние годы в западных странах, а также Китае и Японии. В апреле 2015 года компания Google запатентовала централизованную систему управления роботами, в которой формирование и передача управляющих инструкций осуществляется через сетевое облако.

Таким образом, ключевым элементом сетецентрической системы управления робототехническими объектами является обеспечение надежной связи между всеми компонентами системы.

Обеспечение информационной связности в робототехнических системах

Общим принципом обеспечения бесперебойной работы телематических сетей и информационной связности сети является резервирование или дублирование каналов связи [2]. При этом возможно несколько различных вариантов резервирования:

а) использование холодного или горячего резерва – это ситуация, в которой один или несколько каналов не участвую непосредственно в процессе передачи данных, а находятся в состоянии ожидания и используются только в случае выхода из строя основного канала;

б) агрегирование каналов связи – технология, которая позволяет объединить несколько физических каналов связи в один логический, а также контролировать их состояние, таким образом, пропускная способность результирующего канала будет больше пропускной способности каждого входящего в него, но меньше их суммы за счет необходимости отправки служебной информации;

в) ячеистые сети с динамической структурой и маршрутизацией – узел сети может функционировать в режиме коммутатора для остальных участников, между любыми узлами сети, в общем случае, существует несколько альтернативных маршрутов и обрыв любого из них не приводит к нарушению информационной связности узлов.

Первый вариант подразумевает необходимость наличия оборудования, которое, в штатном режиме, не участвует в процессе функционирования робота, но занимает некоторый объем и снижает грузоподъемность мобильного робота. Таким образом, в наших работах мы используем применение только технологии агрегирования каналов связи (для объединения нескольких каналов сети WiFi в один логический канал), а также развертывание MESH сети поверх таких агрегированных каналов.

Многие специалисты отмечают, что одним из наиболее эффективных способов решения задачи обеспечения информационной связности роботов, является развертывание такой MESH сети на базе мобильных роботов и стационарных объектов сетевой инфраструктуры [3,4]. Специалисты NASA также отмечают необходимость организации MESH сети в космосе и при напланетных исследованиях [5,6].

В результате такого интенсивного информационного обмена всех робототехнических объектов порождается большой объем информации, для обработки которой требуются существенные аппаратные ресурсы. Для решения задачи обработки таких объемов данных и предоставления доступа к глобальной (общей) информации каждому робототехническому объекту необходимо использовать технологии обработки «больших данных» в высокопроизводительной среде облачных вычислений [7].

Применения облачных технологий в робототехнических системах

Использование облачных технологий позволяет сделать существенный шаг в автоматизации процессов управления робототехническими устройствами и создать глобальные информационные инфраструктуры, как совокупности связанных информационных систем, обеспечивающих процессы сбора, передачи, хранения и обработки информации на различных уровнях ее использования военными, социальными, экономическими и другими организациями [8,9].

Формирование единого информационного пространства для функционирования облачных систем необходимо строить на основе данных, качество которых является достаточно высоким. В интересах построения и последующего уточнения целостной картины обстановки из разрозненных фрагментарных данных решается задача сбора, накопления и интеллектуальной обработки всех сложно структурированных данных сети, например, карты местности на основе данных видео- и лазерных сенсоров. Соответственно, с точки зрения обработки информации в высокопроизводительной облачной среде, выделяются два класса систем – пользователей облачных вычислений, которые отличаются структурой и алгоритмом функционирования [10]:

а) классические системы, основанные на использовании всего перечня динамических облачных ресурсов, которые доступны и при проведении вычислений на компьютерах центра обработки данных не требуют дополнительной информации, изменяющейся в реальном времени. К ресурсам относятся вычислительные сети, серверы, хранилища данных, программное обеспечение, сетевые сервисы и другие;

б) гибридные системы, которые используют облачные ресурсы, но отличаются наличием собственной подсистемы, предназначенной для добывания и обработки информации в реальном масштабе времени. Именно к таким системам относится система управления киберфизическими объектами (включая специальные и космические роботы и т.д.) [9].

При этом необходимо отметить, что учет факта непрерывного изменения информации позволяет снять ограничения, присущие статичным системам, в которых известное понятие целостности предполагает существование информации в неизменном виде по отношению к некоторому фиксированному ее состоянию [11].

Реализация облачных сервисов будет осуществляться на базе платформы «Пилигрим», применение которой показано на рисунке 1. «Пилигрим» предоставляет сервис масштабируемых вычислительных ресурсов (виртуальных машин), образуя единое вычислительное пространство управления мобильными роботами с использованием акторного механизма взаимодействии и организации интегрированной среды обмена сообщениями. Каждый мобильный робот имеет свой отдельный поток с логическим адресом, по которому отправляется сообщение и может быть получен ответ. Актор объекта имеет непосредственную связь со своим агентом (мобильным роботом или удаленным сервисом), отправляющим оперативную информацию и получающим управляющие сигналы. Акторы могут обмениваться информацией между собой, но сам процесс информационного обмена физически локализован на базе стационарного модуля в среде облачных вычислений. Кроме акторов робота в платформе «Пилигрим» реализованы акторы-сервисы, предоставляющие вспомогательные услуги, такие как доступ к базам данных и топографической информации (глобальной карте местности) и т.д.

Платформа «Пилигрим» является разработкой ЦНИИ РТК и представляет собой облачную платформу класса «инфраструктура как сервис» (IaaS) для организации функционирования виртуальных машин, программно-реконфигурируемых сетей и систем хранения. Платформа разработана на базе открытого программного кода системы OpenStack. На рисунке 1 платформа «Пилигрим» функционирует на втором и третьем уровнях.

Важной особенностью платформы «Пилигрим» является возможность построения картины оперативной ситуационной обстановки на базе информации, доступной всем роботам, к которой может

обратиться любой актор робота и на основе полученной информации сформировать и передать управляющую команду своему агенту. Кроме того, предусмотрена возможность настройка актора на определенные события, генерируемые другими акторами на основе сообщений, присылаемыми их агентами.

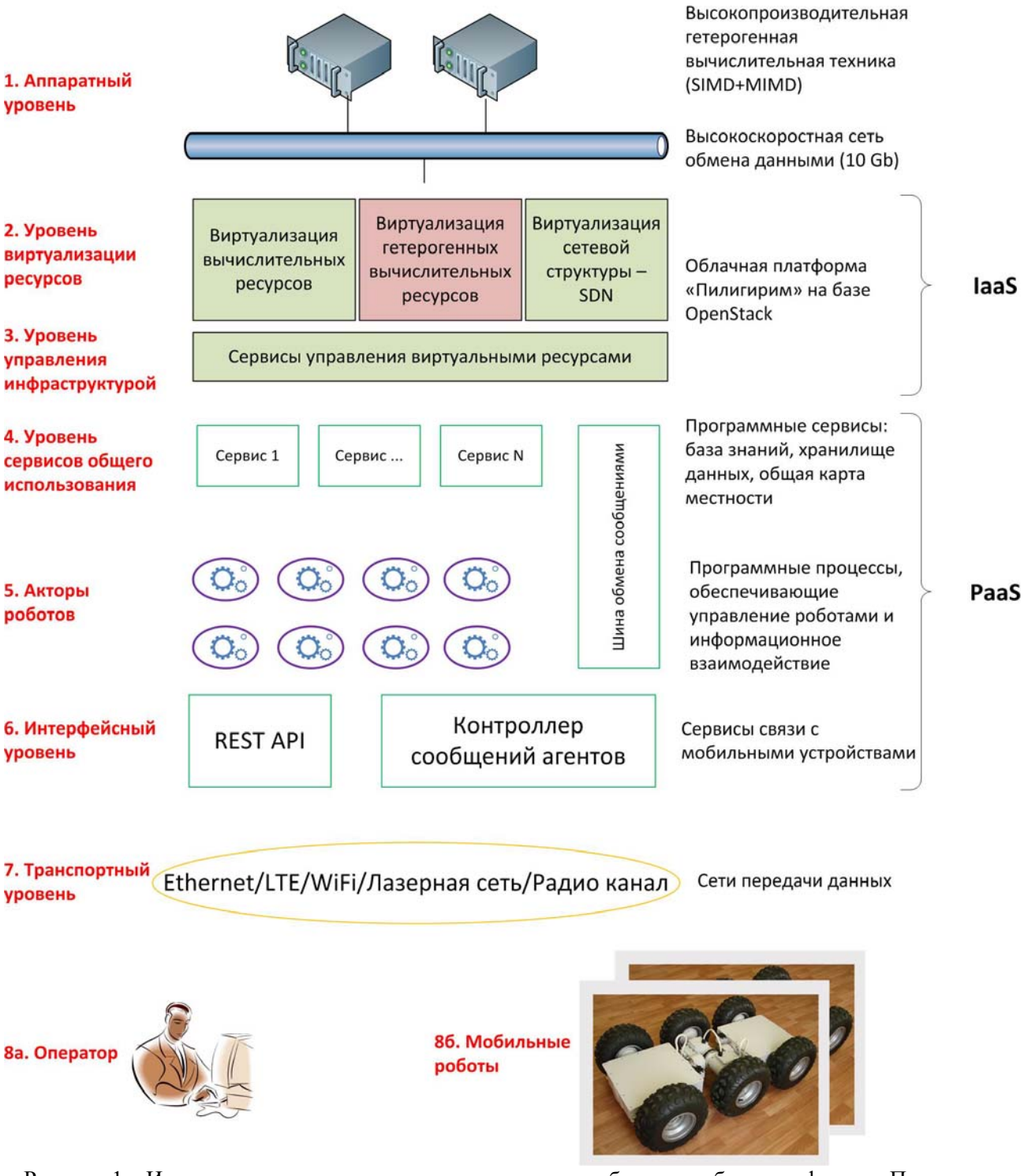


Рисунок 1 – Иерархическая модель системы управления роботами на базе платформы «Пилигрим»

Предложенный в платформе «Пилигрим» сетецентрический метод организации информационного обмена позволяет реализовать различные классы алгоритмов управления мобильными роботами, функционирующими в условиях пространственно-временной неопределенности. Платформа может быть успешно использована для управления крупными группировками мобильных роботов.

Доступ к облачной платформе предоставляется через интерфейсы управления: программные библиотеки, командный интерфейс и веб приложение. Спецификой платформы «Пилигрим» является ее ориентация на анализ данных, поступающих от группировок напланетных роботов. В рамках текущей работы платформа «Пилигрим» применяется для построения облачного сервиса виртуальных

машин на базе гетерогенной вычислительной техники, что позволит организовать реконфигурацию аппаратного обеспечения под решаемую задачу за счет применения технологий виртуализации вычислительных ресурсов, масштабирования и реконфигурации сетевой подсистемы. Виртуальные представители (акторы) робототехнических средств размещаются в виртуальных машинах, функционирующих в облачной среде «Пилигрим».

Задача построения карты местности на основании данных сканирующего лазерного дальномера

Одной из задач, решаемых в процессе функционирования группы мобильных робототехнических объектов является построение и поддержание актуальности общей карты местности. В процессе решения этой задачи необходимо осуществить сбор сенсорных данных, предварительную их обработку, передачу в центральный узел сети, обработку и формирование общего облака точек, а также векторизацию полученных данных.

Схема информационных потоков, реализующих построение общей карты местности и прокладку маршрута с использованием данных этой карты, показана на рисунке 2. В соответствии с этой схемой, данные от лазерного локатора в форме потока отчетов расстояния до окружающих предметов поступают в бортовой вычислительный компьютер. Для снижения нагрузки на гетерогенную высокопроизводительную среду облачных вычислений бортовой компьютер осуществляет предварительную обработку и фильтрацию данных, а также снабжает данные от лазерного локатора координатными метками от бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС).

Полученные данные передаются по гетерогенным каналам связи в высокопроизводительную среду облачных вычислений. Для создания объединенной карты местности от нескольких мобильных роботов используется комбинированный метод, объединяющий итерационный метод подбора величин смещения и поворота облака точек с координатными данными БИНС. Данные навигационной системы используются как начальное значение для итерационного алгоритма, что позволяет применять БИНС с относительно низкой частотой обновления данных (5-10 Гц), а также существенно сокращает вычислительную сложность и количество шагов итерационного метода. В качестве метода итерационных приближений применяется NDT (Normal Distributions Transform) – преобразование с использованием нормального распределения.

Рисунок 2 – Схема информационных потоков при построении карты местности и навигации по ней

Объединенная карта местности размечается на зоны разрешенные и запрещенные для движения мобильного робота. По разрешенным зонам прокладывается маршрут в заданную точку. Затем кривая маршрута делится на определенные отрезки, соответствующие простейшим операциям робота и отправляется на бортовой вычислитель для отработки двигателями мобильного робота.

Заключение

В рамках данной работы разработана концепция, в которой каждый робот рассматривается как киберфизический объект, состоящий из аппаратно-программной части (агента) и «виртуального» аватара,

представленного совокупностью вычислительных процессов, которые реализуются в гетерогенной облачной вычислительной среде, взаимодействующей с бортовым вычислителем с помощью беспроводных высокоскоростных сетей связи. Такая модель функционирования киберфизических объектов, в которой бортовые вычислительные ресурсы дополнены сервисами, предоставляемыми средой облачных вычислений, позволяет решить различные задачи управления и обеспечить ряд важных преимуществ, включая:

- расширенный класс алгоритмов управления и планирования операций за счет объединения всех доступных информационных ресурсов киберфизических объектов;
- возможность хранения и структурирования сенсорных данных большого объема;
- общее пространство данных, ситуационная осведомленность всех агентов системы;
- возможность оперативного изменения алгоритмов поведения и реакции роботов на внешние возмущения (перезагрузка аватара киберфизического объекта в режиме реального времени);
- взаимодействие между аватарами через высокоскоростную сеть передачи данных внутри облачной среды.

В работе рассматривается архитектура системы супервизорного сетецентрического управления для роботов наземного и космического базирования, а также приводится пример решения задачи навигации мобильных робототехнических платформ с использованием сенсорной лидарной информации.

Работа выполнена в рамках Федеральной целевой программы "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы", соглашение № 14.578.21.0143 от 09.11.2015, уникальный идентификатор ПНИ RFMEFI57815X0143.

1 Wheeler, J. A. (1989) Information, physics, quantum: the search for links. Proceedings III International Symposium on Foundations of Quantum Mechanics, Tokyo, pp. 354-368.

3 Лопухов, И. Концепция параллельного и кольцевого резервирования // Современные технологии автоматизации. - 2012. - №1.- С.18-25

4 Kurochkin M., Glazunov V., Kurochkin L. and Popov S. «Instrumental environment of multi-protocol cloud-oriented vehicular mesh network». In 10th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO), 2013.

5 Капустян Сергей Григорьевич. Методы и алгоритмы коллективного управления роботами при их групповом применении: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук: 05.02.05. - Ростов-на-Дону, 2008. - 310 с.

6 M. DeCristofaro et al., «Heterogeneous Wireless Mesh Network Technology Evaluation for Space Proximity and Surface Applications» DOI: 10.2514/6.2014-1600, AIAA SpaceOps 2014 Conference, May 2014.

7 Goforth M. B. et al. «Avionics Architectures for Exploration: Wireless technologies and human spaceflight» //Wireless for Space and Extreme Environments (WiSEE), 2014 IEEE International Conference on. – IEEE, 2014. – С

8 Заборовский В.С., Лукашин А.А., Мулюха В.А. Платформа управления киберфизическими объектами // Открытые системы. СУБД. 2014 №9 С. 30-32

9 Городецкий В.И., Серебряков С.В., Троцкий Д.В. Средства спецификации и инструментальной поддержки командного поведения автономных агентов // Изв ЮФУ. Техническиенауки № 3 (116). 2011 с. 23 41

10 Zaborovsky V., Lukashin A., Kupreenko S., Mulukha V. «Dynamic Access Control in Cloud Services» // The 2011 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (IEEE SMC 2011), Anchorage, Alaska, USA, October 9-12, 2011 – pp. 1400-1404

11 Roy Thomas Fielding. Architectural Styles and the Design of Network-based Software Architectures / Dissertation submitted for the degree of doctor of philosophy in Information and Computer Science, University Of California, Irvine, 2000 [Электронныйресурс]. Режим доступа: http://www.ics.uci.edu/~fielding/pubs/dissertation/top.htm, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения 30.06.2016).

I. Dalyaev, I. Shardyko

EXPERIMENTAL MODEL OF A MANIPULATOR FOR ON-ORBIT SERVICING SPACECRAFT

CRDI RTC, Saint-Petersburg
igor@rtc.ru, i.shardyko@rtc.ru

Abstract

To enhance longevity and safety level of unmanned spacecraft, especially on high orbits including geostationary ones, it is thought suitable to exploit on-orbit servicing (OOS) units equipped with manipulation systems. The need for manipulators here is caused by requirement to execute tasks such as refueling, equipment replacement, orbit correction and maintenance tasks. The key feature of a manipulator to fulfill these list if force-torque feedback.

This paper describes a general concept of the manipulator to carry out the on-orbit servicing tasks along with the common and kinematic description of a ground prototype. A brief look at graphical user interface designed for testing purposes is represented. A ground validation facility is described and the description of series of tests to be performed is included.

Keyword: on-orbit servicing, space robotic systems, supervised autonomy, ground testing, validation, control system, force-torque control, robotic software.

И.Ю. Даляев, И.В. Шардыко

МАКЕТНЫЙ ОБРАЗЕЦ МАНИПУЛЯЦИОННОЙ СИСТЕМЫ СЕРВИСНОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург
igor@rtc.ru, i.shardyko@rtc.ru

Аннотация

В целях повышения долговечности и надёжности беспилотных космических аппаратов, в особенности, работающих на высоких орбитах, в том числе – на геостационарной, во многих странах мира разрабатываются проекты космических аппаратов для проведения обслуживания на орбите (OOS), оборудованные манипуляционными системами. Необходимость установки манипулятора вызвана перечнем задач, стоящих перед подобным аппаратом: дозаправка, замена функциональных блоков, проведение коррекции орбиты и выполнение технологических операций. Одной из главных особенностей манипулятора при этом является наличие силомоментной обратной связи.

В данной статье представлен проектный облик такой манипуляционной системы, а также приведены кинематическая схема и конструктивные особенности макетного образца для наземной отработки системы. Далее приведено краткое описание интерфейса программы для проведения испытаний макетного образца. В завершении статьи дано описание стенда для исследовательских испытаний макетного образца, раскрыта программа испытаний.

Ключевые слова: обслуживание на орбите, робототехническая система космического назначения, система управления, силомоментное управление, наземная отработка, программное обеспечение роботов.

Введение

Современная космическая робототехника представляет собой перспективное научно-техническое направление, значение которого непрерывно возрастает в связи с необходимостью обслуживания в настоящее время и в перспективе глобальных систем связи, навигации и наблюдения, постоянно действующих пилотируемых и посещаемых орбитальных станций, а также баз на Луне и планетах Солнечной системы. Задачи, связанные с поддержкой функционирования орбитальных космических аппаратов, в особенности автоматических, принято обозначать термином “обслуживание на орбите” (on-orbitservicing), а аппараты для выполнения таковых задач – сервисными космическими аппаратами. Основной целью орбитального обслуживания является повышение срока активного существования и надежности функционирования КА и, как результат, снижение экономических показателей на поддержание группировки КА. Достижение цели связано с решением таких задач, как [1]:

- доставка топлива, необходимого для поддержания КА на орбите, выполнения маневров, стабилизации аппарата в целом, и дозаправка КА в автоматическом режиме;
- замена панелей солнечных батарей, которые деградируют с течением времени;
- ремонт/замена блоков аппаратуры из состава КА;

- контактная инспекция КА.

Дополнительно выделяется задача изменения параметров орбиты обслуживаемого КА, в том числе – увод с рабочей орбиты на орбиту захоронения, что не продлевает срок активного существования КА, но освобождает место на рабочей орбите для нового КА.

Для решения перечисленных задач наиболее рациональным шагом видится включение в состав сервисного КА манипуляционной системы (МС). Примером может являться проект DEOS(SpaceTech, Германия)[2], моделирование процесса сближения и подготовки к захвату которым обслуживаемого аппарата проиллюстрировано кадром, представленным на рисунке 1а.

ЦНИИ РТК и КБ “Арсенал” ведут совместные работы по созданию сервисного КА с очувствлённой по усилию МС[3,4]. Проектный облик аппарата представлен на рисунке 1б. В сферу ответственности ЦНИИ РТК входит манипуляционная система, для наземных испытаний которой был разработан макетный образец МС.

Особенности МС, связанные с условиями применения и требованиями назначения

К непосредственным задачам МС сервисного КА относятся [5]:

- захват элементов обслуживаемого КА с целью стыковки;
- доставка инспекционного оборудования в точку проведения инспекции и перемещение оборудования в процессе инспекции;
- снятие, перемещение и установка элементов КА: блоков аппаратуры, панелей солнечных батарей;
- выполнение технологических операций, таких как сверление, работа с соединителями, покраска и очистка.

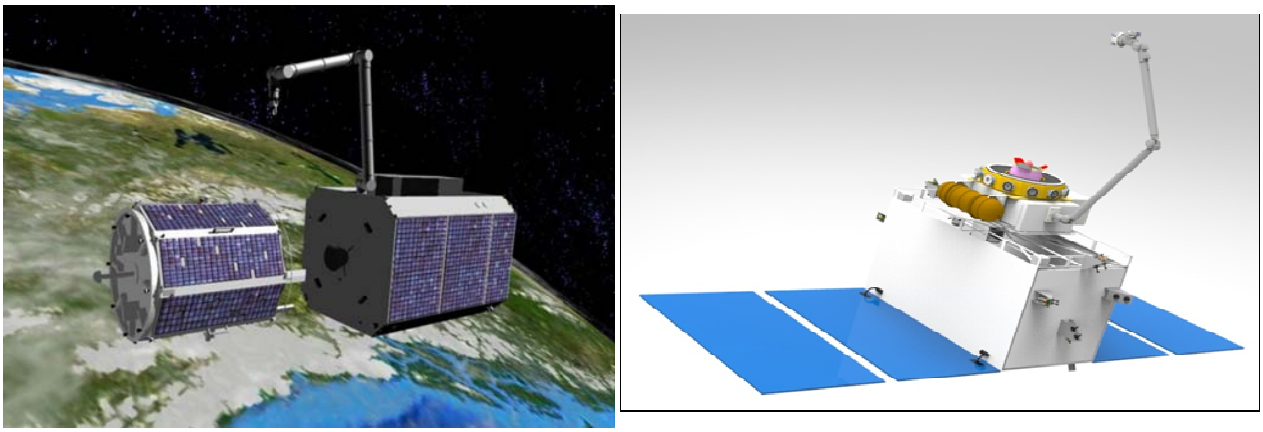


Рисунок 1 — Проектный облик КА для проведения обслуживания на орбите: DEOS, «Орбита»При этом работа МС в составе сервисного КА характеризуется рядом особенностей, в том числе:

- существенное расстояние между оператором, находящимся на планете (Земле, в перспективе – Луне, Марсе) либо на орбитальной станции, и сервисным КА на орбите обслуживаемого КА, приводящее к задержкам при передаче измерительных и управляющих сигналов;
- высокая стоимость космических аппаратов, их оборудования, и проведения миссий в целом, определяют предельно высокие требования к безопасности работы МС, в частности, необходимость контроля усилий при выполнении операций.

Указанные особенности дают основания сделать выбор супервизорного управления, при котором автоматическая работа МС сочетается с регулярным контролем хода процесса оператором, в качестве основного способа управления МС. Кроме того, необходимым видится включение в состав МС системы силомоментного очувствления и участие получаемой информации в формировании управляющих сигналов. Система управления МС, для того чтобы обеспечить выполнение МС требований назначения, должна функционировать в режимах:

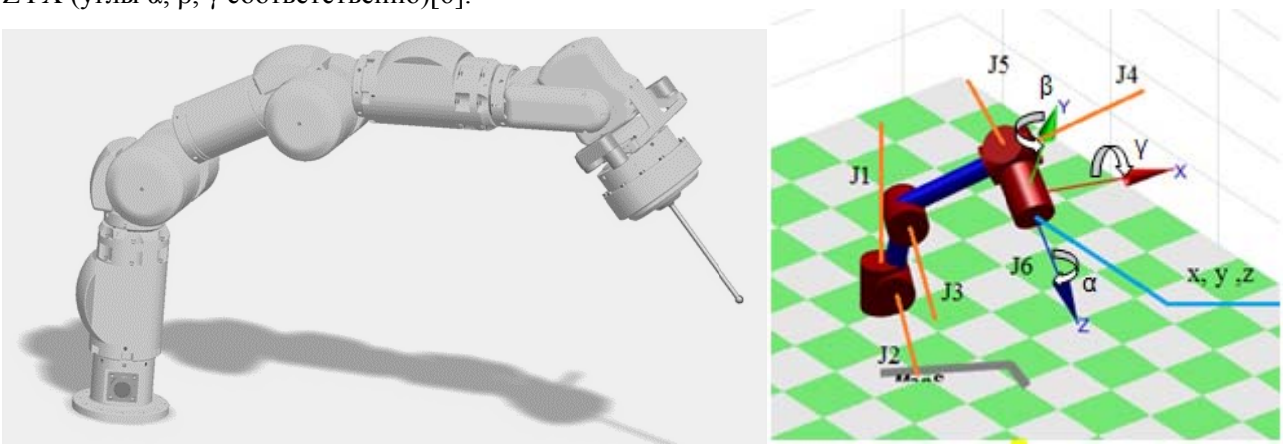
- исполнения позиционной траектории с заданной скоростью движения с контролем непревышения допустимого уровня усилий (в случае контактами с препятствиями);
- развития требуемого усилия на рабочем органе, в том числе, в зависимости от времени;
- движения в определённом направлении с заданной скоростью при развитии заданного вектора усилия.

Описание макетного образца манипулятора

Для экспериментальных исследований разработанных конструктивно-компоновочных и схемотехнических решений, а также для настройки и отладки управляющих алгоритмов системы управления МС был разработан и изготовлен макетный образец МС. Внешний вид макетного образца представлен на рисунке 2а. Макетный образец отличается в первую очередь длинами звеньев (расстояниями между осями исполнительных шарниров), так как в условиях действия силы тяжести исполнительные шарниры МС неспособны компенсировать вес полноразмерной системы, при этом кистевой узел макетного образца идентичен кистевому узлу разработанной МС. Системы очувствления и управления также соответствуют проекту МС, макетный образец должен быть способен функционировать в тех же режимах, что и МС.

Кинематические схемы МС и макетного образца (представлена в виде модели на рисунке 2б) совпадают в части взаимной ориентации исполнительных шарниров. Такая кинематическая схема позволяет обеспечить произвольную ориентацию исполнительного устройства (ИУ) в пределах сервисной зоны.

Основными применяемыми системами координат (СК) являются: декартова система, связанная с основанием манипулятора “База” (неподвижная) и декартова система, связанная с ИУ манипулятора “Схват” (подвижная). Для описания ориентации рабочего органа используется система углов Эйлера ZYX (углы α, β, γ соответственно)[6].

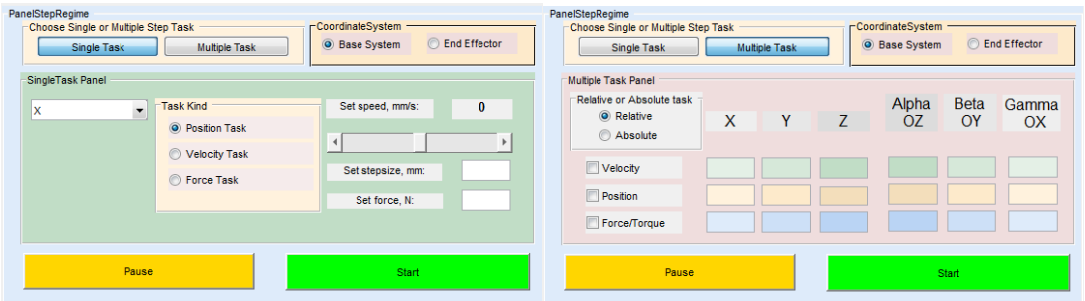


а б

Рисунок 2 — Макетный образец манипулятора и его кинематическая модель

Тестовое программное обеспечение

Для экспериментальных исследований макетного образца было разработано тестовое ПО, позволяющее задать движение с произвольной комбинацией целевого положения, скорости перемещения и развиваемого на ИУ усилия по каждой из координат, в СК “База” и “Схват”. Такой выбор задаваемых величин соответствует требованиям назначения макетного образца. В частности, не составляет труда задать движение с некоторой скоростью по оси OYc развитием определённого усилия по оси OZв СК “База”. Интерфейс ПО предоставляет две формы приёма данных, вид которых приведён на рисунке 3, при этом форма на рисунке 3а допускает ввод данных лишь по одной координате при каждом задании, форма на рисунке 3б – любую произвольную комбинацию данных по всем координатам одновременно. СК “База” соответствует опции “Base”, СК “Схват” - опции “EndEffector”.



а б

Рисунок 3 — Интерфейс тестового ПО

Экспериментальные исследования макетного образца

Цель исследований заключается в определении технических характеристик, а также в тестовой отработке разработанных режимов функционирования макетного образца.

Для проведения исследований был разработан и изготовлен исследовательский стенд, внешний вид которого приведён на рисунке 4. Стенд включает панели: “Траектория 1” (2), “Траектория 2” (3), “Отверстия” (4), “Динамометр” (5), “Резьбовые соединения” (6) и “Весы” (7). [7]

К числу подтверждаемых технических характеристик макетного образца относятся: объём и форма сервисной зоны, рабочий диапазон скоростей, значения предельных усилий, развиваемых исполнительными шарнирами и диапазон измеряемых значений данных усилий.

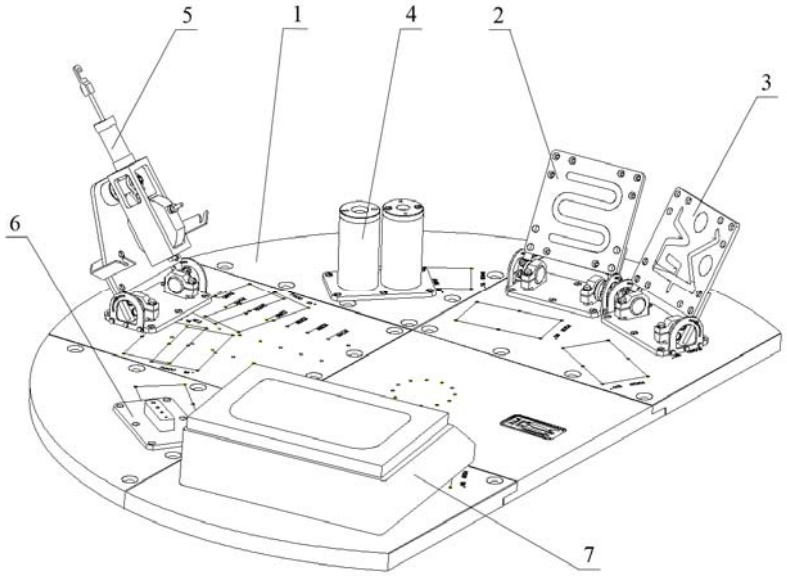


Рисунок 4 — Внешний вид стенда для проведения ИИ

Определение точности отработки траектории в позиционном режиме предусмотрено на панели «Весы», перемещением через последовательность опорных точек с выполнением остановки (паузы) в каждой из них. Положение опорных точек выбрано на высоте 10 мм над поверхностью весов для определения отклонения по оси OZ. Задание положения осуществляется в СК «База». Отклонение фактического положения от заданного в каждой из точек должно быть менее 10 мм, фактическая погрешность позиционирования макетного образца подлежит определению. Наибольшую сложность связана с высокой податливостью узлов макетного образца, в связи с чем по результатам испытаний в том числе предполагается получение модели жёсткости.

Также данная панель предназначается для испытаний, при котором ИУ должно перемещаться вдоль поверхности весов с определённой скоростью, создавая при этом заданную силу давления на поверхность весов. Фактическая сила давления при этом будет измеряться при помощи весов.

Исследование на панели “Динамометр” заключается в задании величины усилия растяжения динамометра при помощи ИУ и сравнении его с фактическим усилием на динамометре. Должны быть рассмотрены случаи различной ориентации динамометра и различной величины усилий.

Исследования на панели “Резьбовые соединения” включает завинчивание гаек из ряда М3 – М6 на заданную величину усилия затяжки. Фактическое усилие затяжки проверяется измерительным ключом.

На панели “Отверстия” выполняются испытания, при котором ИУ перемещается к отверстию с линейным и угловым смещением относительно оси отверстия, и должно успешно выполнить заход в отверстие. В различных экспериментах задаются различные величины смещений, испытания проводятся на каждом из двух доступных отверстий, отличающихся диаметром, при этом все эксперименты должны быть завершены без превышения допустимых усилий.

На панели “Траектория2” ИУ, первоначально заведённое в верхнюю точку паза и переведённое в режим огибания препятствий, при задании движения вдоль панели вниз, должно перемещаться в соответствии формой паза, не вызывая усилий, превышающих допустимые. Аналогичный вид имеют эксперименты, проводимые на других участках данной панели и панели «Траектория 1», с учётом

траектории задаваемого движения. При задании траектории, невозможной для выполнения (попадании в локальный экстремум), движение должно прекратится с мгновенной выдачей соответствующего сообщения оператору.

Заключение

Макетный образец МС для сервисного КА предназначен для проверки возможности выполнения задач, подобных фактическим задачам МС в рамках перспективных миссий. Разработанное программно-математическое обеспечение предоставляет широкие возможности по заданию режимов функционирования макетного образца в тестовых условиях. Для удобства формирования оператора заданий для МС в будущем будет разработан специализированный интерфейс, при этом тестовое ПО имеет архитектуру, позволяющую легко интегрировать программный модуль описания и расчётов тестового ПО с перспективным программным модулем интерфейса.

В ближайшем будущем будут проведены экспериментальные исследования макетного образца МС. По результатам исследований будут сделаны выводы о возможности макетного образца, и в частности, его системы управления, обеспечивать высокий уровень надёжности и безопасности при работе, и возможности применения реализованных идей в разработку опытного образца МС для сервисного КА.

Работа выполняется при финансовой поддержке Минобрнауки России. Уникальны идентификационный номер проекта RFMEFI57814X0046.

1. Разработка технического (проектного) облика робототехнической системы с очувствленными по усилению манипуляторами в составе сервисного космического аппарата: отчёт о ПНИ (2 этап - промеж.) / ЦНИИ РТК. – 2015. – 137 с.
2. DEOS – The German Robotics Approach to Secure and De-Orbit Malfunctioned Satellites from Low Earth Orbits / Reintsema D., Thaeter J., Rathke A., Naumann W., Rank P., Sommer J. // Robotics and Automation in Space (i-SAIRAS), 2010, Sapporo, Japan
3. Технический облик средств робототехнического обеспечения сервисного спутника, предназначенного для продления сроков активного существования космических аппаратов / Даляев. И.Ю, Шардыко И.В., Кузнецова Е.М. // Экстремальная робототехника: Труды международной научно-технической конференции. – СПб: Изд-во «Политехника-сервис», 2015. – С. 1 181 – 186.
4. Means of Robotic Support for On-Orbit Servicing / Lopota A., Dalyaev I., Shardyko I., Kuznetcova E., Belezyakov I. //Proceedings of the 26th DAAAM International Symposium, pp.0865-0870, B. Katalinic (Ed.), Published by DAAAM International, ISBN 978-3-902734-07-5, ISSN 1726-9679, Vienna, Austria
5. Разработка технического (проектного) облика робототехнической системы с очувствленными по усилению манипуляторами в составе сервисного космического аппарата: отчёт о ПНИ (1 этап – промеж.) / ЦНИИ РТК. – 2014. – 202 с.
6. Siciliano B., Khatib O. Handbook of Robotics. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008. – 1611 p.
7. Разработка технического (проектного) облика робототехнической системы с очувствленными по усилению манипуляторами в составе сервисного космического аппарата: отчёт о ПНИ (4 этап – промеж.) / ЦНИИ РТК. – 2016. – 127 с.

I.G.Sokhin[1], Yu.V. Lonchakov[1], V.A. Sivolap[1], M.V. Mikhailyuk[2], V.B.Sychkov[3]

EXPERIMENTAL ERGONOMIC STUDIES OF REMOTE INTERACTION BETWEEN COSMONAUTS AND ANTHROPOMORPHIC ROBOTIC ASSISTANTS USING VIRTUAL ENVIRONMENT TECHNOLOGIES

[1]Federal State Budgetary Organization «Gagarin Research & Test Cosmonaut Training Center», Star City,
i.sokhin@gctc.ru
[2]Scientific Research Institute for System Analysis of the RAS, Moscow
mix@niisi.ras.ru
[3]Public company «Scientific Production Association «Android Technics», Magnitogorsk
vladtrav@inbox.ru

Annotation

Virtual reality technologies have a great importance for laboratory and semi-natural ergonomic research as they allow evaluating the designed cosmonaut-robot interface functions. The Cosmonaut Training Center has performed experimental studies of user characteristics of the software/hardware complex for a cosmonaut-operator's workstation and the processes of controlling an anthropomorphic robotic assistant using the emulation of executed interaction scenarios between 3D models of robots and the environment. The paper considers the results of experimental ergonomic studies of remote controlling the anthropomorphic robotic assistants using full-scale exoskeletons and virtual 3D models of robots and the environment.

Keywords: space crew extravehicular and intravehicular activity, anthropomorphic robotic assistant, exoskeleton, ergonomic support, induced and augmented virtual reality.

Introduction

At present, the implementation of future programs of deep space exploration, interplanetary missions to the Moon, Mars and the nearest asteroids is closely associated with the use of space robotic systems [1]. One development line of robotic systems in manned space exploration is the development of so-called anthropomorphic robotic assistants for crews (RAs), i.e. robots that look like a human and have the analogous kinematic characteristics. Those anthropomorphic robots possess some advantages compared with other types of robotic systems when performing high-precision operations in human-machines interfaces of manned space complexes. Anthropomorphic robotic assistants for crews can operate in a standalone mode as well as can be controlled remotely in a master-slave mode. The master-slave mode is more efficient in the situations of uncertainty, when the goal-setting and activity algorithm should be flexibly adapted to the changing external conditions. A man is adapted to such kind of activity in the best way. Therefore, the human advantages can benefit for robots remote control in a master-slave mode by using exoskeletons [2-4]. A crewmember or an operator of the Mission Control Center can execute the robot control functions.

In the modern context, due to the absence of experience in the use of anthropomorphic robotic assistants during space operations, the ergonomic support of their designing, testing and operation gains in importance [6]. Ergonomic support is necessary, in particular, for the substantiation of ergonomic requirements for anthropomorphic robotic systems, inclusion of them in technical requirements for designing the models of robotic assistants. Ergonomic requirements should ensure the optimization of joint activity of cosmonauts and RAs in space missions [7].

For tackling tasks of ergonomic support and experimental studies of the interaction between cosmonauts and RAs, the virtual environment technologies may be effectively applied [8-9]. These technologies allow carrying out studies using virtual interactive 3D models of robots and the environment without conducting full-scale experiments with costly models of robots. Thus, the current level of technology makes it possible to ensure the high fidelity of virtual simulation of both visual and dynamic characteristics.

In general, the scheme of the interaction with the model is as follows [5, 10]. An operator puts on the special suit (exoskeleton) which allows fixing the human movements to a high precision. An exoskeleton feeds control signals into the simulation system, which calculates angles of rotation and coordinates of the robot's effectors. Resultant angles and coordinates are transmitted into the system of 3D simulation, which synthesizes the image of current positions of robot's elements and the environment on the monitor screen (or on a large wall screen) in a mono or stereo mode. On basis of the resulting image an operator performs the necessary movements which are displayed in real time, i.e. at least at 25 frames per second. Thereby, an operator gains a feel of the continuous movements of the robot model, which repeats the operator's movements. If to set the inertial characteristics of the robot, its elements and surrounding objects (mass, inertia tensors, etc.), it becomes possible to simulate the real dynamics of the robot's movements. This includes: processing of collisions of robot's elements with surrounding objects, the capture and manipulation the objects, the impact on robots by other objects, etc. Various damages, off-nominal situations, operation execution algorithms, etc. can be simulated on the virtual scene.

The virtual reality technologies are also efficient for the creation of cosmonaut-robot interfaces. Examples are the modes of induced and augmented virtual reality. The mode of induced virtual reality consists in that in the process of activity of a real space robot all parameters of its movements (rotation angles of its links) are transmitted by telemetry in real time into the virtual model on the Earth or inside the spacecraft. On basis of this data the virtual model will exactly repeat the movements of a real robot. Thereby, a cosmonaut will be able to exercise additional visual control of on-line operations on the virtual model in real time. In so doing, arbitrary observation angles are available, including those that are absent in reality. This allows increasing the operational efficiency of anthropomorphic robots. The mode of augmented virtual reality consists in combining the real situation, observed by cameras, with the virtual scene. It gives an operator the additional capabilities to control robot actions.

In 2015, experimental ergonomic studies of the remote robot control in a master-slave mode were carried out for the first time at the Gagarin Cosmonaut Training Center. In a number of tests the following equipment was used: the full-scale specimen of the human-machine interface of a master-slave type (exoskeleton, the product of the Scientific Production Association "Android Technics"), the operator helmet Oculus Rift DK2 and virtual 3D models of an anthropomorphic robot and an environment (the joint product of the Scientific Production Association "Android Technics" and the Scientific Research Institute for System Analysis of the RAS).

Main results of experimental ergonomic studies of the interaction between a cosmonaut and an anthropomorphic robot in the virtual environment

At this stage of studies the following tasks were formulated:

- Evaluate the possibilities of controlling the 3D model of an anthropomorphic robot remotely in a master-slave mode;
- Evaluate the quality of the "presence effect" simulation under robot virtual control;
- Evaluate the physical limitations (tight fit conditions, constrained movements, etc.) due to the exoskeleton put on an operator;
- Evaluate an operator's perception for the quality of conformance of own movements and the movements of robot's effectors;
- Evaluate the comfort level and fatigability of an operator when he uses the virtual reality helmet;
- Develop the expert proposals and recommendations on improving the characteristics of the hardware/software complex for controlling robots and 3D models.

Cosmonauts and skilled instructors, conducting cosmonaut training for dynamic operations (more than 30 persons) have taken part in the experiment. The exoskeleton, virtual reality helmet and various medical sensors (Fig. 1) were put on test operators. Test tasks included operations of grasping and moving objects on the desktop as well as nominal flight operations, performed by cosmonauts inside the pressurized modules of the International Space Station and on its surface in open space. Each operator worked in the virtual environment uninterruptedly at the average about an hour.

Figure 1 – An operator controls the remote virtual robot

Experimental studies were comprehensive in nature – the whole complex of psycho-physiological parameters and performance indices of test operators before, during and after the experiments as well as the quality indices of robot control have been evaluated (Fig. 2). The conducted experiments have allowed developing the unique methodology of experimental research on basis of: an analysis of operator activity; conditions for carrying out the tasks; difficulties that arise in the course of carrying out the tasks; physiological and psychological parameters of operators. To select relevant partial evaluation techniques, the theoretical-methodological analysis of scientific literature, statistical analysis of data, observations, interviewing, expert evaluations, psychological testing have been employed.

Figure 2 – Comprehensive study of cosmonaut's capabilities to perform test operations using the virtual robot

After completing the experiments and statistical processing of their results the following conclusion have been made:

1. The possibility in principle to control a mobile robot in a master-slave mode when using the test outfit along with the emulation of the interaction scenarios of 3D models of RAs and the environment was demonstrated.
2. The carried out studies did not confirm some publications on adverse reactions of the visual analyzer, proprioceptive system, vestibular system, muscular system, which could complicate the virtual control of a robot. Preliminary analysis shows the absence of adverse physiological reactions preventing the fulfillment of tasks when controlling the 3D model of a robot using the exoskeleton kit and the helmet of virtual reality.
3. Some deficiencies (technical, technological, ergonomic), significantly affecting the characteristics of controllability of the software/hardware complex for the operator workstation were revealed.
4. The overall evaluation of the "presence effect" is positive: an operator feels himself inside the situation and acts as an active element of the system and the control process in whole. When working with RAs, own ideas and visuals of an operator prevailed. Due to some model restrictions (the absence of sensitization, distortion of geometric dimensions, shortcomings of the helmet of virtual reality, insufficient simulation of physical conditions and others) the "presence effect" appeared worse than expected.

Conclusion

Developments in the use of virtual 3D models for practicing space operations with the help of anthropomorphic RAs seem to be very relevant and promising. Methodical approach to testing the workstation of an operator of crews' anthropomorphic robotic assistants was proposed and tested in the course of the said experiments. A comprehensive study of user characteristics of the software/hardware complex for the workstation of an operator controlling RAs using 3D models of robots and the environment including the monitoring and the assessment of physiological and psychological status of an operator and the quality of control was carried out. Proposals on the improvement of characteristics of the software/hardware complex for an operator workstation were developed. Obtained results could be used for the creation and experimental testing the promising ergatic systems "cosmonaut – robot – professional activity environment".

И.Г. Сохин[1], Ю.В. Лончаков[1], В.А. Сиволап[1], М.В. Михайлюк[2], В.Б. Сычков[3]

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ЭРГОНОМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИСТАНЦИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОСМОНАВТОВ С АНТРОПОМОРФНЫМИ РОБОТАМИ ПОМОЩНИКАМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИЙ ВИРТУАЛЬНОГО ОКРУЖЕНИЯ

[1]Федеральное государственное бюджетное учреждение Научно-исследовательский испытательный центр подготовки космонавтов, Звездный городок, Моск. обл.
i.sokhin@gctc.ru
[2]Федеральное государственное учреждение «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований РАН», Москва
mix@niisi.ras.ru
[3]Публичное акционерное общество «Научно-производственное объединение «Андроидная техника», г. Магнитогорск
vladtrav@inbox.ru

Аннотация

Использование технологий виртуальной реальности имеет большое значение при лабораторных и полунатурных эргономических исследованиях, позволяя оценить характеристики разрабатываемого человеко-машинного интерфейса «космонавт-РПЭ». В Центре подготовки космонавтов были проведены экспериментальные исследования пользовательских характеристик программно-аппаратного комплекса рабочего места космонавта-оператора и процессов дистанционного управления антропоморфным РПЭ с эмуляцией выполняемых сценариев взаимодействия 3D-моделей РПЭ и окружающей обстановки. В статье рассматриваются результаты экспериментальных эргономических исследований дистанционного управления антропоморфными роботами-помощниками с использованием натурных экзоскелетов и виртуальных 3D-моделей роботов и окружающей среды.

Ключевые слова: внекорабельная и внутрикорабельная деятельность космических экипажей, антропоморфный робот-помощник, экзоскелет, эргономическое сопровождение, индуцированная и дополненная виртуальная реальность.

Введение

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

В современных условиях в связи с отсутствием опыта применения антропоморфных роботов-помощников экипажей (РПЭ) в космической деятельности актуальность приобретает эргономическое сопровождение процесса их создания, испытаний и эксплуатации [6]. Эргономическое сопровождение необходимо, в частности, для обоснования эргономических требований к АРТС, включения этих требований в состав технических заданий на выполнение опытно-конструкторских работ по созданию образцов РПЭ. Эргономические требования должны обеспечить оптимизацию совместной деятельности космонавта и РПЭ в условиях космического полёта [7].

Для решения задач эргономического сопровождения, проведения экспериментальных исследований взаимодействия космонавтов с РПЭ могут найти эффективное применение технологии виртуального окружения [8-9]. Их использование позволяет проводить исследования на виртуальных интерактивных 3D моделях роботов и окружающей среды без проведения натурных экспериментов с дорогостоящими макетами роботов. При этом на текущем уровне развития технологий можно обеспечить высокую достоверность виртуального моделирования как в части визуальных, так и динамических характеристик.

Общая схема работы с моделью выглядит следующим образом [5, 10]. Оператор надевает специальный костюм (экзоскелет), который позволяет с высокой точностью фиксировать движения человека. Управляющие сигналы от экзоскелета поступают в систему моделирования, где вычисляются углы поворота и координаты отдельных звеньев АРТС. Результирующие координаты и углы передаются в систему 3D моделирования, которая синтезирует на экране монитора (или большом настенном экране) в моно или стерео режиме изображение робота с текущими положениями его звеньев, а также окружающую обстановку. Ориентируясь на полученное изображение, оператор выполняет необходимые движения, которые в реальном масштабе времени (т.е. с частотой не менее 25 кадров в секунду) отображаются на экране. Таким образом, у оператора возникает ощущение непрерывного движения модели робота, повторяющей движения оператора. Если в виртуальной сцене

задать инерционные характеристики робота, его звеньев и окружающих объектов (массы, тензоры инерции и т.д.), то можно моделировать реальную динамику работы робота. К ней относятся обработка столкновений частей робота с окружающими объектами (коллизии), захват и манипуляции с объектами, воздействие на робота другими объектами и т.д. На виртуальной сцене можно моделировать различные повреждения, нештатные ситуации, стратегии выполнения операций и т.д.

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

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

Основные результаты экспериментальных эргономических исследований взаимодействия космонавта с антропоморфным роботом в виртуальной среде

На данном этапе исследований ставились следующие задачи:

- оценка возможности дистанционного управления 3-D моделью антропоморфного робота в копирующем режиме;
- оценка качества реализации «эффекта присутствия» при виртуальном управлении роботом;
- оценка физических ограничений (стеснённости, скованности и др.), накладываемых на оператора задающим устройством копирующего типа (ЗУКТ);
- оценка восприятия оператором степени соответствия собственных движений и движений манипуляторов робота;
- оценка комфортности и утомляемости оператора при использовании шлема виртуальной реальности;
- разработка экспертных предложений и рекомендаций по улучшению характеристик аппаратно-программного комплекса управления роботом и 3D-моделей.

В эксперименте принимали участие космонавты и квалифицированные инструкторы, проводящие подготовку космонавтов по динамическим операциям (всего более 30 человек). На операторов-испытателей накладывались задающее устройство, шлем отображения виртуальных сцен и множество медицинских датчиков (рис. 1). Тестовые задания операторам включали операции взятия и перемещения с помощью робота предметов на рабочем столе, а также штатные полетные операции, выполняемые космонавтами внутри гермоотсеков Международной космической станции и на её поверхности в открытом космосе. В среднем непрерывная работа каждого оператора в виртуальном окружении составляла около одного часа.

Рисунок 1 – Оператор дистанционно управляет действиями виртуального робота

Экспериментальные исследования носили комплексный характер – оценивался комплекс показателей психофизиологического состояния работоспособности операторов-испытателей до, во время и после проведения экспериментов, также оценивались показатели качества управления роботом (рис. 2). В ходе исследований была разработана уникальная методика экспериментальных исследований, основанная на анализе деятельности операторов, условий выполнения ими поставленных задач, затруднений, возникающих в процессе их деятельности, результатов физиологических и психологических исследований операторов. Для отбора релевантных частных методик оценивания был использован теоретико-методологический анализ научной литературы, статистический анализ данных, наблюдения, опросы, экспертная оценка, психологическое тестирование.

Рисунок 2 – Проведение комплексных исследований по оценке возможностей космонавта дистанционно выполнять тестовые операции с помощью виртуального робота

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

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

используемого шлема виртуальной реальности, недостаточно полное моделирование физических условий и др.) «эффект присутствия» оказался ниже ожидаемого.

Заключение

Разработки в области использования виртуальных 3D моделей для отработки бортовых полетных операций с помощью антропоморфных РПЭ представляются весьма актуальными и перспективными. В ходе экспериментальных исследований предложен и опробован методический подход к проведению экспериментальных исследований рабочего места оператора антропоморфного РПЭ. Проведено комплексное исследование пользовательских характеристик программно-аппаратного комплекса рабочего места оператора, управляющего РПЭ с использованием 3D-моделей РПЭ и окружающей обстановки, включающее мониторинг и оценивание физиологического, психологического состояний оператора и качества управления. Разработаны предложения по усовершенствованию характеристик программно-аппаратного комплекса рабочего места оператора РПЭ. Полученные результаты исследований целесообразно использовать при создании и экспериментальной отработке перспективных эргатических систем «космонавт - робот - профессиональная среда деятельности».

1. Лончаков Ю.В., Сохин И.Г. «Роботы в пилотируемой космонавтике: опыт применения и дальнейшие перспективы». Материалы XLIX научных чтений памяти К.Э. Циолковского, 2014, г. Калуга.
2. Сохин И.Г., Сорокин В.Г., Крючков Б.И. Применение антропоморфных робототехнических систем для поддержки деятельности экипажей перспективных пилотируемых комплексов. Тезисы докладов 8 Международного аэрокосмического конгресса, Москва, 2015 г., с.400-405.
3. Сохин И.Г., Сорокин В.Г. Возможные области применения антропоморфных роботов-помощников экипажей в отсеках перспективных космических комплексов. Научный журнал «Пилотируемые полеты в космос», №4(17), 2015, с. 71-79. Звездный городок.
4. 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.
5. Жиденко И.Г., Кутлубаев И.М. Методика определения сигналов управления антропоморфным манипулятором //Мехатроника, автоматизация, управление. – 2014.– №5– С.41-46.
6. Лончаков Ю.В., Сиволап В.А., Сохин И.Г. «Эргономические проблемы создания и применения антропоморфных роботов-помощников экипажей перспективных космических миссий». Труды международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника», 2015, СПб, с. 191-199.
7. Сохин И.Г., Сорокин В.Г. Системный подход к обоснованию эргономических требований к роботу-помощнику экипажа пилотируемого космического комплекса. Научный журнал «Пилотируемые полеты в космос», №1(18), 2016, с. 89-98. Звездный городок.
8. 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», 2013, СПб, стр. 219-229.
9. Михайлюк М.В. Видеотренажерный комплекс управления роботами и манипуляторами. Труды Международного симпозиума «Инновационные технологии в исследовании окружающей среды», Ларнака-Москва, 13 – 17 мая 2013 г., стр. 84-85.
10. Михайлюк М.В., Видеотренажеры для космических робототехнических средств. Сб. научных статей «Фундаментальные проблемы системной безопасности». ВЦ РАН им. А.А. Дородницына. М., Вузовская книга, 2012, стр. 422-432.

N.A. Pavluk, A.L. Ronzhin

DESIGN SOLUTIONS FOR LOWER LIMB ANTHROPOMORPHIC ROBOT ANTARES

St.-Petersburg Institute for Informatics and Automation of RAS
antei.hasgard@gmail.com, ronzhin@iias.spb.su

Abstract

An overview of the existing anthropomorphic robots and an analysis of servomechanisms and bearing parts involved in the assembly of robot's legs are presented. We propose an option for constructing the legs of

the robot Antares under development. A two-motor layout, used in the knee, ensures higher joint power along with independent interaction with the neighboring upper and lower leg joints when bending.

Keywords: Anthropomorphic robots, servomechanisms, kinematic scheme, Antares, component parts design, two-motor knee, pelvic mechanism.

Н.А. Павлюк, А.Л. Ронжин

КОНСТРУКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ НИЖНИХ КОНЕЧНОСТЕЙ ДЛЯ АНТРОПОМОРФНОГО РОБОТА АНТАРЕС

Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН, Санкт-Петербург
antei.hasgard@gmail.com, ronzhin@iias.spb.su

Аннотация

Рассматривается задача проектирования конструктивных решений ног для антропоморфных роботов, приводится обзор существующих антропоморфных роботов с анализом сервоприводов и несущих деталей, задействованных при сборке ног роботов. Предложен вариант конструкции ног для разрабатываемого робота Антарес. Использованная в колене двухмоторная компоновка обеспечивает большую мощность узла, независимое взаимодействие с соседними узлами бедра и голени при сгибе.

Ключевые слова: Антропоморфные роботы; сервоприводы; кинематическая схема; Антарес; конструкции деталей; двухмоторное колено; тазовый механизм.

Введение

Среди проблемных вопросов наиболее остро стоящих перед разработчиками мобильных роботов общего и специального назначения являются решение вопросов геометрической и опорной проходимости по сильнопересеченной местности, обеспечения автономности движения и управления кинетическим оборудованием роботов [1]. Созданная природой рычажно-шарнирная система передвижения человека и животных наиболее приспособлена для естественной земной поверхности и целесообразна для использования при передвижении антропоморфного робота [2].

Отсутствие единой методологии, математического и программного обеспечения для проектирования рычажно-шарнирных систем антропоморфных роботов вынуждает разработчиков при проектировании каждого конкретного робота создавать свое обеспечение. Целью данной статьи является анализ существующих конструктивных решений по построению рычажно-шарнирных механизмов нижних конечностей (ног) антропоморфных роботов и разработка на его основе рациональной конструкции ног для робота Антарес [3].

Обзор существующих антропоморфных роботов

Одна из простейших конструкций двуногого робота описана в [4]. Он собран из двухмиллиметрового листового алюминия, включает шесть сервоприводов, управляется контроллером EyeBot и имеет вес 1,11 кг. При ходьбе робот достигает скорости 120 м/час при максимальном угле между бедрами 60 градусов.

В работе [5] антропоморфный робот Lola, имеющий конструкцию ног с 7 степенями свободы, весит 55 кг при росте 180 см. Обсуждается проблема устойчивости робота после остановки, а также поэтапное соприкосновении частей ступни с поверхностью во время ходьбы. Эластичные материалы носка и каблука ступни робота обеспечивают снижение силы удара на конструкцию робота при касании поверхности.

Домашний ассистивный робот с 14 приводами и 16 степенями свободы, представленный в работе [6], имеет антропоморфную конструкцию только верхней части тела и колесную базу. Основное внимание в работе уделено манипуляции предметов двумя руками роботов при перемещении домашних объектов.

Антропоморфный робот SWUMANOID ростом 92 см, использующий в конструкции 24 сервопривода серии Dynamixel, в исследовании [7] разработан для моделирования движений и плавания в воде. Нестабильное качение тела робота в воде осложняет расчет кинематики движений плывущего робота, состоящего из 21 составного конструктивного элемента. В работе [8] предложена оригинальная программная платформа для моделирования кинематической схемы движения ног антропоморфных роботов, где элементы ног рассматриваются как последовательно соединенные детали, а для решения прямой и обратной задачи движения ног применяются рекурсивные алгоритмы с пониженной вычислительной сложностью.

На основе проведенного анализа конструкций антропоморфных роботов наиболее близкими аналогами к разрабатываемому роботу Антарес были определены робот Poppy французской компании INRIA Flowers и робот Darwin-OP компании Trossen Robotis.

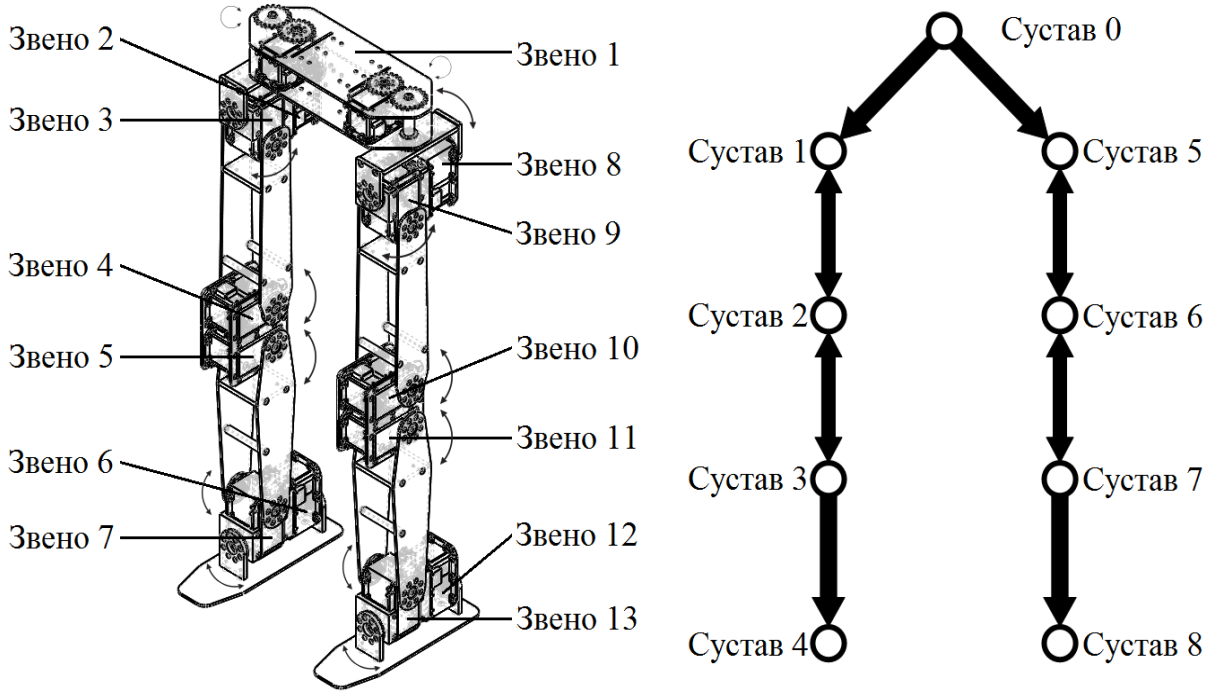
Детали антропоморфного робота Poppy созданы на основе 3D-печати, что позволило сильно удешевить производство деталей робота и сделало возможным применение менее мощных сервоприводов, однако отобразилось на его устойчивости и стабильности при ходьбе. Робот имеет 25 сервоприводов Dynamixel MX-64 и MX-28 [9], обеспечивающих беспрепятственное перемещение конечностей с заданной точностью и запасом по прочности, поскольку редукторы выполнены из металла. Робот управляется одноплатным компьютером Raspberry Pi, оснащен 16 силоизмерительными датчиками, 2 HD-камерами, стереомикрофоном и инерционным измерительным устройством. В качестве «лица» у Poppy используется LCD-экран, на который могут выводиться «эмоции» или информация об ошибках. Модульная конструкция робота помогает исследователю изменять движения любой конечности путем изолирования желаемой конечности от остальной части тела, практически никак не влияя на производительность. Конструкция специально рассчитана на установку дополнительных датчиков и прокладку соединительных проводов. Кроме того, подобный дизайн облегчает периодическое техническое обслуживание робота. Однако центр массы Poppy расположен в солнечном сплетении, что негативно сказывается на распределении нагрузки. Робот становится неустойчив и не способен самостоятельно передвигаться (только с поддержкой человека). Poppy обладает аналогичным Антаресу количеством степеней свободы в тазовой части, распределяя их иным способом, но существенно проигрывает в подвижности в коленном и голеностопном узлах. В узлах ног используется всего 3 двигателя (по одному в голеностопном, коленном и тазобедренном узлах), что негативно сказывается на подвижности робота в целом, если судить по видеоматериалам разработчиков и находящимся в свободном доступе проектным файлам робота.

Робот Darwin-OP представляет собой робототехническую платформу, предназначенную для научных исследований и разработок в рамках образовательного процесса. DARwin OP обладает высокой производительностью, разнообразным набором сенсорных устройств и высокими динамическими характеристиками. Робот взаимодействует с людьми с помощью динамиков, микрофонов, камер, тактильных сенсоров, светодиодов, рук, телодвижений. Имеет 20 сервопривода фирмы Dynamixel, которые обеспечивают беспрепятственное перемещение конечностей с заданной точностью и запасом по прочности, так как шестерни выполнены из металла. Центр массы расположен в центре таза, обеспечивая оптимальное местоположение для правильного распределения нагрузки и инерции при ходьбе, особенно в конечностях. Модульная конструкция робота помогает исследователю изменять движения любой конечности Darwin OP. Конструкция также рассчитана на установку дополнительных датчиков.

Разработка конструкции нижних конечностей антропоморфного робота Антарес

Для создания конструкции Антарес выделено несколько этапов, связанных с разработкой узлов ноги, руки, торса и головы. Первоочерёдность разработки узла ноги определяется следующими причинами: высокая сложность компоновки деталей данного узла, необходимость данного узла для перемещения робота в пространстве, сложность просчета конструкции узла в связи с предполагаемой наиболее высокой нагрузкой деталей по отношению ко всем остальным узлам.

На кинематической схеме (Рис. 1, а) отображена общая компоновка всех звеньев, образующих единый механизм нижних конечностей, и приведен древовидный граф (Рис. 1, б), представляющий кинематическую структуру этого исполнительного механизма робота. Тазовый механизм в схеме и графе указан единым узлом (Рис. 1, б) и звеном (Рис. 1, а), так как выполняет по отношению к каждой ноге только функцию осевого вращения, далее в каждой ноге каждый сервопривод отмечен как отдельное звено. Так как кинематическая схема ног робота является ветвящейся, это вызывает определенные трудности при ее описании. Это связано с тем, что последовательная компоновка узловых соединений указана звеньями, каждое из которых отвечает за осуществление движения в своей плоскости движения, и является созависимым с ближайшими узловыми элементами и звеньями. Это вызвано тем, что положение каждого следующего звена в пространстве зависит от предшествующего ему в кинематической схеме, что также отображено в графе. Исключением является находящийся в начале схемы тазовый механизм, так как в данном случае его положение в пространстве является результатом работы всего механизма. Для понимания взаимосвязей в кинематической схеме (Рис. 1, а) и представлен древовидный граф (Рис. 1, б), из которого видно, что звенья объединены в суставы, кроме конечных узлов 4 и 8, являющихся стопами ног робота. Из графа видно, что суставы 1,2,3 и 5,6,7 имеют двунаправленные связи, это обусловлено созависимостью между этими узлами, так как они напрямую влияют на положение друг друга в пространстве во время передвижения робота.



(а) (б)

Рисунок 1 – Кинематическая схема и древовидный граф нижних конечностей робота Антарес

Общая конструкция ног включает в себя узел тазового механизма и два идентичных по конструкции узла ног, состоящих из более простых узлов крепления к тазовому механизму, тазобедренного сустава, бедра, колена, голени, голеностопа и стопы. Узлы тазового механизма и ног робота разработаны в соответствии с пропорциями человеческого организма, с поправкой на предполагаемый рост. Их длина составила 510,7 мм. При разработке узлов ног длина голеностопного и бедренного узлов составила по 20 см (без учета соединений). Так как в кинематике робота данные узлы играют роль плеча рычага, такое конструктивное решение является обоснованным, так как разница в длине достигается соединением голенного узла с узлом голеностопного сустава, в свою очередь соединенным со стопой, причем бедренный узел соединяется с узлом тазобедренного сустава, соединяющегося с узлом крепления к тазобедренному механизму.

На основе использования в колене двухмоторной компоновки получен отдельный узел ноги, взаимодействующий с соседними узлами бедра и голени, позволяя им быть независимыми при сгибе. Помимо этого, использование двухмоторного колена упрощает выбор сервопривода, так как в таком колене нагрузка делится на два отдельных двигателя. Еще одним плюсом узла является то, что упрощается разработка конструкции вышеупомянутых узлов бедра и голени. Основу конструкции ноги робота Антарес составляют соединенные стяжками и поперечными пластинами прямые пластины. При изготовлении деталей использованы листы алюминия толщиной 2, 4 и 10 мм. Для поперечных стяжек применены алюминиевые прутья толщиной 6 мм.

Конструкция ноги разработана таким образом, что обеспечивает двигателям большие углы поворота, что обеспечивает большую гибкость и пластичность узла по сравнению с приведенными аналогами, что и показано на рисунке 2. Не считая тазового механизма, отвечающего за осевые повороты ног и являющегося отдельным узлом, в конструкции ног применены сервоприводы Dynamixel MX-64. Каждый Dynamixel имеет уникальный ID для подключения к общей шине данных, поддерживают соединения по TTL, RS485 и др., возможность подключения в общую шину управления, имеющиеся функции активации LED или аварийного отключения (Torque-off) могут быть установлены на заданные значения температуры, тока и напряжения. Сервоприводы можно настроить двигаться более плавно.

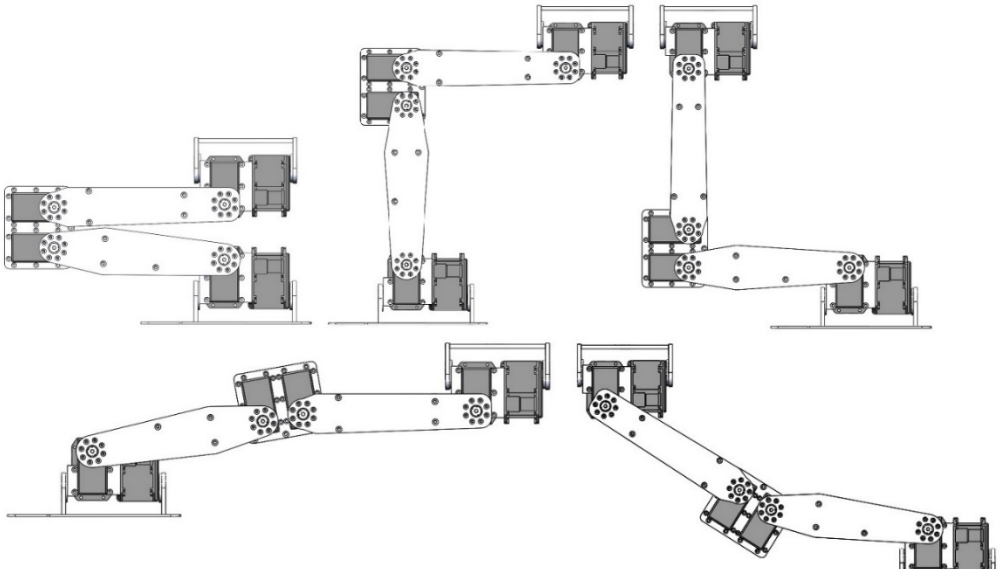


Рисунок 2 – Возможности функционала ноги с коленом двухмоторной компоновки

Управление сервоприводами Dynamixel может осуществляться с ПК, либо микроконтроллера, что является существенным достоинством при разработке прототипов. В таблице 1 приведено сравнение различных углов отклонения положений ног человек, и разработанного прототипа антропоморфного робота Антарес. На основании этой таблицы можно сделать выводы, что различные типичные действия человека и робота будут выполнимы вторым, так как диапазоны изменения углов положения человека находятся в пределах изменений углов робота.

Таблица 1. Сравнение углов человека и углов робота Антарес

	Человек	Антарес
Диапазон по тангажу стопы	от -50º до 40º	от -88º до 180º
Диапазон по крену стопы	от -30º до 20º	от -90º до 90º
Диапазон сгибания - разгибания, для бедра	от +120º до 20º	от +110º до 45º
Диапазон сгибания - разгибания для колена	от 0º до 110º	от 0º до 162º
Диапазон отведения ноги в тазобедренном суставе	от 0º до 45º	от 0º до 90º
Диапазон относительного приведения ноги в тазобедренном суставе	от 0º до 30º	от 0º до 55º
Диапазон поворота для бедра	от -45º до 45º	от -45º до 45º

Стоит отметить, что за исключением диапазона по крену стопы, все остальные углы ограничены условно с целью исключить ненужное соприкосновение деталей, находящихся в момент движения в одной плоскости. Робот представляет собой робототехническую платформу, предназначенную для научных исследований и разработок в рамках образовательного процесса, поэтому его модульная природа может помочь исследователю изменять движения любой конечности изолированием желаемой конечности от остальной части тела, практически не влияя на производительность. Распределение весовой нагрузки в ногах робота с учетом максимального предполагаемого веса 8 килограмм происходит по следующей формуле:

$$F = P/2 = 80/2 = 40\ N,$$

где: F- сила, прикладываемая к сборке голени, P - вес, который держит голень, в знаменателе 2, так как весь вес распределяется на 2 ноги.

Конструкция специально рассчитана на установку дополнительных датчиков и прокладку соединительных проводов. Так же предложенное конструкторское решение облегчает периодическое техническое обслуживание робота. Проведенный анализ конструкции показал, что все отдельные детали, сборки, и готовые узловые элементы робота являются достаточно крепкими и способны выдерживать нагрузку, значительно превышающую предполагаемый вес готового прототипа робота, равный 8 килограммам.

Заключение

При разработке конструкции ног робота Антарес в колене использована двухмоторная компоновка, обеспечивающая большую мощность узла, независимое взаимодействие с соседними

узлами бедра и голени при сгибе. Снижение электрической нагрузки на основной аккумулятор робота достигается использованием вспомогательных аккумуляторов в бедренных отделах ног, осуществляющих питание сервоприводов. Непосредственное управление сервоприводами также выполняется вспомогательными контроллерами, отвечающими за работу всех 6 двигателей, установленных в суставных узлах ног робота. Исследования конструкции прототипа показали, что отдельные узлы и детали имеют более, чем десятикратный запас прочности. Разрабатываемый робот ориентирован на применение в образовательных целях для участия в соревнования роботов-футболистов, а также создания ассистивных технологий человеко-машинного взаимодействия на основе многомодальных интерфейсов [10-12], и для отработки моделей и сценариев поведения аварийно-спасательных роботов при чрезвычайных ситуациях [13-15].

1. Лапшин В.В. Об устойчивости движения шагающих машин // Наука и Образование. МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 2014. – № 6. С. 319-335.
2. Карпенко А.П. Робототехника и системы автоматизированного проектирования. Учебное пособие. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 71 с.
3. Павлюк Н.А., Будков В.Ю., Бизин М.М., Ронжин А.Л. Разработка конструкции узла ноги антропоморфного робота АНТАРЕС на основе двухмоторного колена // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2016. – № 1 (174). – С. 227-239.
4. Warnakulasooriyaa S., Bagheria A., Sherburnb N., Shanmugavel M. Bipedal Walking Robot – A developmental design // Procedia engineering, 41 (2012). P. 1016-1021.
5. Buschmann T., Lohmeier S., Ulbrich H. Humanoid Robot Lola: Design and Walking Control // Journal of Physiology, 103 (2009). P. 141-148.
6. Mohameda Z., Capi G. Development of a New Mobile Humanoid Robot for Assisting Elderly People // Procedia Engineering, 41 (2012). P. 345- 351.
7. Nakashima M., Tsunoda Y. Improvement of Crawl Stroke for the Swimming Humanoid Robot to Establish an Experimental Platform for Swimming Research // Procedia Engineering, 112 (2015). P. 517-521.
8. Shah S.V., Saha S.K., Dutt J.K. Modular Framework for Dynamic Modeling and Analyses of Legged Robots // Mechanism and Machine Theory, 49 (2012). P. 234-255.
9. Электронный каталог компаний «ROBOTIS». Режим доступа: http://en.robotis.com/index/product.php?cate_code=101011 (дата обращения: 27.05.16)
10. Ронжин А.Л., Будков В.Ю., Ронжин А.Л. Технологии формирования аудиовизуального интерфейса системы телеконференций // Автоматизация. Современные технологии. 2011. № 5. С. 20-26.
11. Карпов А.А., Ронжин А.Л. Многомодальные интерфейсы в автоматизированных системах управления // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2005. Т. 48. № 7. С. 9-14.
12. Karpov A.A., Ronzhin A.L. Information Enquiry Kiosk with Multimodal User Interface // Pattern Recognition and Image Analysis, Moscow: MAIK Nauka/Interperiodica, Vol. 19, № 3, 2009, P. 546-558.
13. Мотиенко А.И., Макеев С.М., Басов О.О. Анализ и моделирование процесса выбора положения для транспортировки пострадавшего на основе байесовских сетей доверия // Труды СПИИРАН. 2015. Вып. 43. С. 135–155.
14. Мотиенко А.И., Ронжин А.Л., Павлюк Н.А. Современные разработки аварийно-спасательных роботов: возможности и принципы их применения // Научный вестник НГТУ. 2015. Том 60. №3. С. 147–165.
15. Мотиенко А.И., Басов О.О., Павлюк Н.С. Обеспечение деятельности специализированных аварийно-спасательных служб при возникновении техногенных катастроф // Транспорт России: проблемы и перспективы - 2015. Материалы Юбилейной Международной научно-практической конференции. СПб.: ИПТ РАН. Санкт-Петербург. 2015. Том 2. С. 181–185.

A.N. Afonin, A.Yu. Aleynikov, A.R. Gladyshev, A.V. Popova

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF LAYOUT BIONIC PROSTHETIC HAND BRUSH

Belgorod State University (BelSU)
afonin@bsu.edu.ru

Abstract

The aim of the study was the development and manufacturing of layout bionic prosthetic hand brush to help people with disabilities. On the basis of the known prosthetic hands offered the original design of man-machine interface based on EMG sensors, mechanical assemblies and control system of the major motor functions of the prosthesis. With the help of 3D printing made layout of the prosthesis. The results can be used to create a prototype.

Keywords: bionic prostheses hand brush, EMG sensor, control system, feedback, actuators.

А.Н. Афонин, А.Ю. Алейников, А.Р. Гладышев, А.В. Попова

РАЗРАБОТКА И РЕАЛИЗАЦИЯ МАКЕТА БИОНИЧЕСКОГО ПРОТЕЗА КИСТИ РУКИ.

ФГАОУ ВПО НИУ «БелГУ», г. Белгород
afonin@bsu.edu.ru

Аннотация

Целью проведенного исследования являлась разработка и изготовление макета бионического протеза кисти руки для помощи людям с ограниченными возможностями. На основе анализа известных протезов кистей рук предложена оригинальная конструкция человеко-машинного интерфейса на основе EMG датчиков, механических узлов и системы управления основными двигательными функциями протеза. С помощью 3D печати изготовлен макет протеза. Полученные результаты могут быть использованы при создании опытного образца.

Ключевые слова: бионический протез кисти руки, EMG датчик, система управления, обратная связь, актуатор.

Реабилитация и повышение качества жизни инвалидов, потерявших кисти рук, определяется наличием соответствующих протезов. В России ежегодно требуются более 60 тысяч протезов рук, а производится в семь раз меньше. Дорогая зарубежная продукция этой проблемы не решает. Большая часть протезов нового поколения существует только как прототипы в лабораториях и научных центрах. Фактическая себестоимость изготовления подобных устройств невелика, высокая цена определяется интеллектуальной собственностью их разработчиков. Ведь не каждый может «дать жизнь» искусственной конечности, которая заменит функцию живого органа. Придать протезу максимум количества двигательных функций, эстетический образ и простоту использования в протезировании одни из самых сложных задач медицинских технологий. Следует также учитывать индивидуальные особенности (уровень ампутации, вес, рост, возраст, нагрузки). Человеку необходимо приспособиться к протезу с течением времени.

История развития протезов насчитывает много десятков лет. Еще в древности утерянные конечности заменяли рабочим протезом, предназначенным для восстановления элементарных функций руки, удержания инструментов, самообслуживания. [1] Со временем косметическиепротезы, служащие для восполнения эстетического дефекта внешности, вызванного отсутствием конечности или ее сегмента, сменились тяговыми протезами (функции протеза управляются собственными физическими силами, движение осуществляется при помощи тягового бандажа, который накладывается обычно от протезной руки по спине петлей вокруг здорового плеча), а позже начались разработки бионических протезов (с их помощью человек может регулировать силу захвата и четко координировать свои действия, появляется естественность движений). [2, 3, 4]

В настоящее время наиболее популярными протезами являются Bebionic 3 (благодаря отдельным электродвигателям для каждого пальца руки, bebionic позволяет выполнять скоординированные движения, максимально приближенные к естественным движениям обычной человеческой руки); Michelangelo (**он** имеет небольшой вес и натуральный внешний вид, благодаря четырем подвижным пальцам и большому пальцу, который двигается отдельно от них, **кисть** Michelangelo обеспечивает

инновационную систему захвата) и i-Limb (искусственная рука i-Limb Ultra Revolution ей можно управлять при помощи мышц предплечья, а так же через мобильный телефон, искусственную руку i-Limb можно подключить через беспроводной интерфейс Bluetooth к своему смартфону, на котором установлено необходимое программное обеспечение.), каждый из которых имеет ряд преимуществ и недостатков друг относительно друга. Самым главным недостатком представленных моделей является высокая стоимость. [5,6,7]. В России на данный момент разработкой бионических протезов занимается компания МОТОРИКА, однако они пока находятся на уровне опытных образцов [8].

В настоящее время протезы рук делятся на 4 основных вида:

- косметические – пассивные протезы, которые выполняют только эстетическую функцию;
- тяговые - активные манипуляторы, где функции протеза управляются собственными физическими силами, например, культей и/или плечевым поясом, движение осуществляется при помощи тягового бандажа, который накладывается обычно от протезной руки по спине петлей вокруг здорового плеча;
- бионические - с их помощью человек может регулировать силу захвата и четко координировать свои действия, то есть появляется естественность движений. Разновидностью бионических протезов являются миоэлектрические - протезы рук, возвращающие двигательную активность за счет того, что биохимические процессы преобразуются в электрическое напряжение, которое передается к электронике протеза [9,10].

Так или иначе у каждого из данных видов протезов есть свои недостатки, начиная от таких мелких как малая функциональности/полное отсутствие каких-либо функций, заканчивая высокой себестоимостью. Целью проведенных исследований являлась разработка и реализация бионического протеза кисти рук, обладающего достаточно высокой функциональностью и возможностью адаптации под конкретного человека, при сравнительно невысокой себестоимости.

При проектировании протеза кисти руки была разработана структурная схема (рис. 1), создана компьютерная 3D модель (рис. 2) и схема электрическая принципиальная ведущей платы управления (ведущего контроллера) протезом (рис. 3) [11,12].

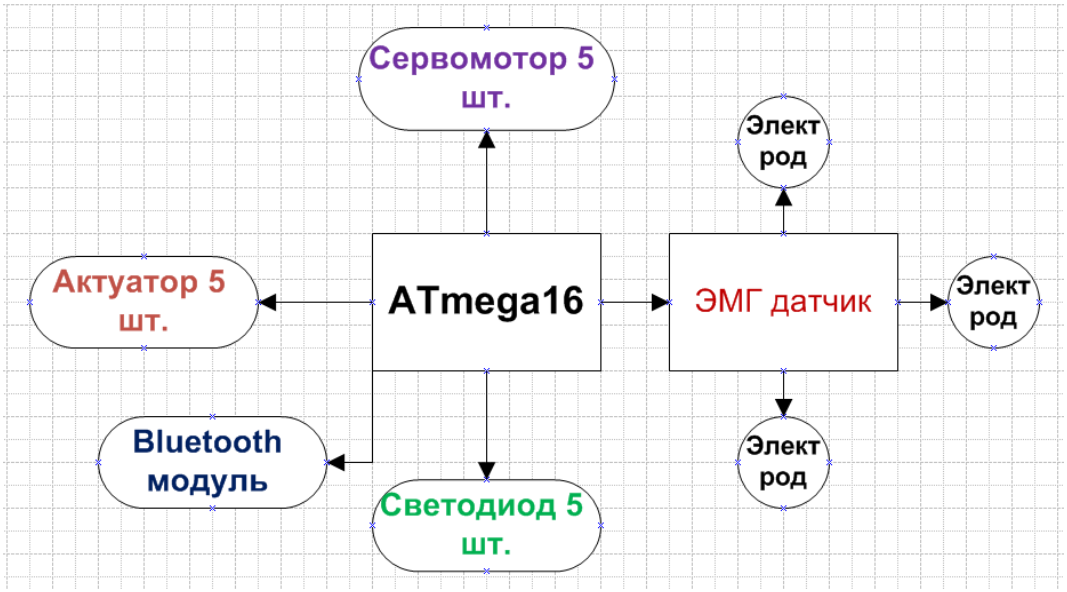


Рисунок 1 – Структурная схема устройства

Механические элементы протеза изготовлены посредством 3D принтера из PLA пластика. Для перемещения пальцев используются сервоприводы. Питание осуществляется от литий-ионной аккумуляторной батареи. Управление приводами осуществляется посредством ШИМ сигнала. Нагрузка на каждый сервопривод определяется их токовым потреблением. Аппаратная часть реализована в виде двух модулей, связанных между собой: модуль протеза и модуль обратной связи с функцией управления.

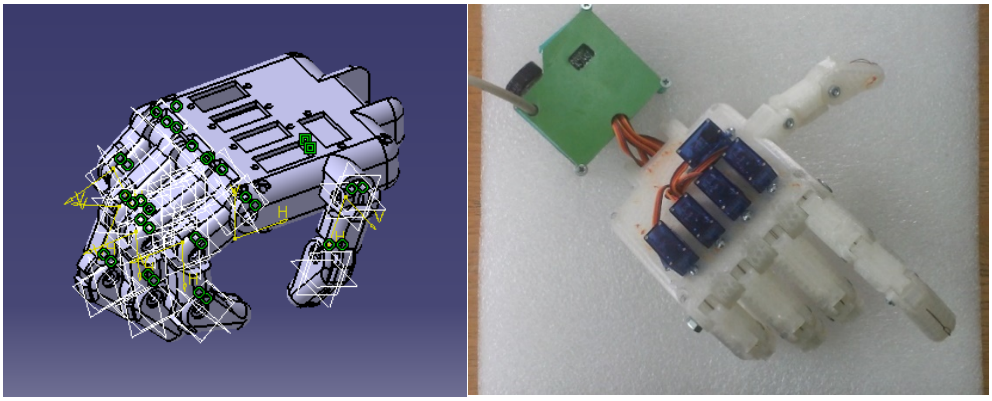


Рисунок 2 – 3D модель и макет устройства

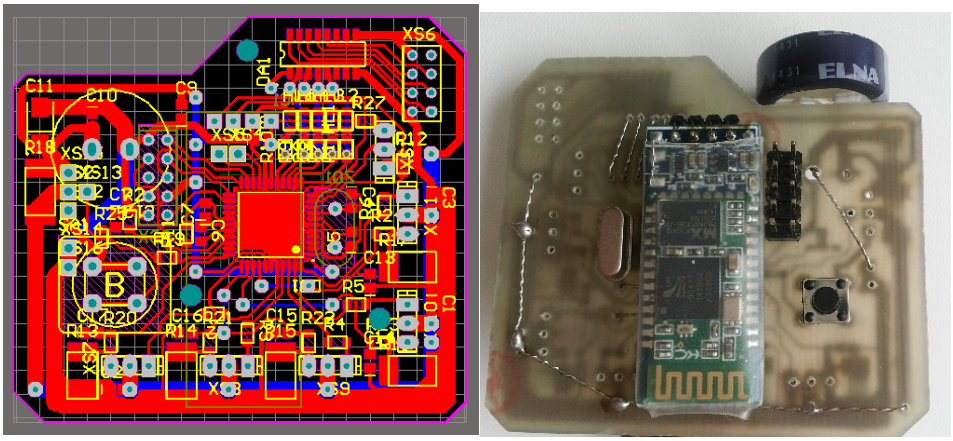


Рисунок 3 – Чертеж ведущей платы управления и модуль в сборе

Предлагаемый способ реализации человеко-машинного интерфейса включает в себя механизм сигнализации пациенту о возможности выполнения одной из набора двигательных функций и механизм запуска на выполнение требуемой функции. Механизм сигнализации задается посредством системы пространственно распределенных вдоль какого-либо органа (например, руки или ноги) актуаторов, создающих тактильное воздействие в заданной точке.

Механизм запуска команды на выполнение определяет воздействие, создаваемое пациентом в требуемый момент времени, численно измеряемое электронным узлом и используемое системой управления в качестве руководства к выполнению двигательной функции (EMG датчики). При этом, степень силового воздействия актуатора системы сигнализации на поверхность тела пациента находится в непосредственной зависимости от силы воздействия внешней среды на элемент исполнительного механизма протеза или протез в целом. Предложенные новые решения и подход в реализации человека-машинного интерфейса не требуют хирургического вмешательства.

Реализация модели демонстрирует применение достижений бионики при построении полезных и нужных устройств, имеющих практическую значимость.

Конкурентные преимущества:

- обеспечение управления двигательными функциями протеза без необходимости проведения подготовительных хирургических операции;
- предложенная реализация человеко-машинного интерфейса позволяет тактильно определить силу воздействия протеза на предмет (предмета на протез) для каждого пальца протеза;
- использование аддитивных технологий при реализации механической части протеза позволяет подойти индивидуально к каждому клиенту.

Бионический протез руки предназначен для использования людьми с ограниченными возможностями с целью частичной компенсации утраченных двигательных функций и относится к области медицинской техники, а именно к управляемым протезам кистей рук.

1. Протезирование рук после ампутацииhttp://xn----7sbflcbakjcpj9aebddhddve0bgs0k.xn--p1ai/%D0%BA%D0%B0%D0%BA-%D0%B2%D1%8B%D0%B1%D1%80%D0%B0%D1%82%D1%8C-

%D0%BF%D1%80%D0%BE%D1%82%D0%B5%D0%B7-%D1%80%D1%83%D0%BA%D0%B8/ (дата обращения 20.07.2016)
2. Виды протезов рук: http://www.orto-kosmos.ru/poleznaya-informatsiya/vidy-protezov-ruk/(дата обращения 20.07.2016)
3. Протезы и ортезы: виды, особенности, назначение: http://ghp-pulse.com/blog/protezy-i-ortezy-vidy-osobennosti-naznachenie(дата обращения 20.07.2016)
4. Протезы верхних конечностей: http://medicina-germany.ru/protezy-verxnix-konechnostej(дата обращения 20.07.2016)
5. Bebionic3 — новое поколение полностью подвижных миоэлектрических кистей.: http://soportho.ru/bebionic3/(дата обращения 25.07.2016)
6. Микеланжело — новинка протезирования: https://ismedicine.wordpress.com/2011/09/22/%D0%BC%D0%B8%D0%BA%D0%B5%D0%BB%D0%B0%D0%BD%D0%B6%D0%B5%D0%BB%D0%BE/(дата обращения 25.07.2016)
7. i-Limb – протез руки под управлением смартфона: http://www.novate.ru/blogs/220413/22900/(дата обращения 28.07.2016)
8. ООО «Моторика»: http://motorica.org/(дата обращения 28.07.2016)
9. Протезы и ортезы: виды, особенности, назначение.\\ http://ghp- pulse.com/blog/protezy-i-ortezy-vidy-osobennosti-naznachenie(дата обращения 29.07.2016)
10. Протезы верхних конечностей\\ http://medicina-germany.ru/protezy-verxnix-konechnostej
11. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники в 3-х томах. Том 1. (The Art of Electronics) Монография. Издание 4-е, переработанное и дополненное. Перевод с английского Б. Н. Бронина, А. И. Коротова, М. Н. Микшиса, О. А. Соболевой (Москва: Издательство «Мир». Редакция литературы по информатике, 1993).
12. Новейшие датчики, Сервоприводы\\ http://amperka.ru/(дата обращения 30.07.2016)

V. Bashlovkina, L. Boykov, L. Stankevich

DELAY TOLERANT NETWORKING ARCHITECTURE USAGE IN A MANAGEMENT OF A GROUP OF ROBOTS

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University
stankevich_lev@inbox.ru

Abstract

Architecture of stable to against ruptures of network applied at control of autonomous mobile robot group which carry out mission in the conditions potentially interfering reliable routing by standard Internet protocols is presented. The basic concepts of DTN and the protocol of parcels (BundleProtocol), used for message transfer in the given networks are described. Besides, survey of the tools is resulted, allowing simulating algorithms of routing on the basis of flexible system of a configuration of experiments.

Keywords: stable to against network ruptures, delay-tolerant networking, group cjntrol, the autonomous mobile robot, simulation of routing protocols.

В.В. Башловкина, Л.В. Бойков, Л.А. Станкевич

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УСТОЙЧИВОЙ К РАЗРЫВАМ СЕТЕВОЙ АРХИТЕКТУРЫ ПРИ УПРАВЛЕНИИ ГРУППАМИ АВТОНОМНЫХ РОБОТОВ

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
stankevich_lev@inbox.ru

Аннотация

Описана архитектура устойчивой к разрывам сети, применяемой при управлении группой автономных мобильных роботов, выполняющие миссию в условиях, потенциально препятствующих надежной маршрутизации стандартными протоколами Интернет. Описаны основные понятия DTN и протокола посылок (BundleProtocol), использующиеся для передачи сообщений в данных сетях. Кроме того, приведен обзор инструментов, позволяющих симулировать алгоритмы маршрутизации на основе гибкой системы конфигурации экспериментов.

Ключевые слова: устойчивые к разрывам сети, delay-tolerantnetworking, групповое управление, автономный мобильный робот, симуляция протоколов маршрутизации.

Введение

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 объектов или манипулирования ими 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.

Одной из важнейших задач при организации управления группой роботов является вопрос маршрутизации в условиях, когда характеристики среды либо динамика самих участников группы могут препятствовать надежной коммуникации. Существующие стандартны Интернета подразумевают постоянную связь между узлами сети на протяжении всего сеанса связи, поэтому требуется применение других принципов построения сетевой архитектуры.

В данной работе рассмотрены принципы построения архитектуры устойчивой к разрывам сети и ее внутренние протоколы, которые применяются для обеспечения надежной связи между автономными мобильными роботами в неизвестной среде выполнения миссии.

Распределенные приложения

При создании платформы для управления группой автономных роботов используются принципы построения *распределенных приложений*. Распределенная система – это набор независимых компьютеров, представляющийся их пользователям единой объединенной системой [1]. Данное определение справедливо и для группы роботов: взаимодействие между человеком и группой роботов строится на формулировании миссий, которые требуется выполнить, при этом каждый отдельный робот является автономным. Одной из важнейших особенностей распределенных систем является легкая *расширяемость* или *масштабируемость*. Характер среды выполнения миссии вполне может оказывать негативное влияние на работоспособность участников группы, поэтому способы объединения роботов в группы должны учитывать этот факт и не полагаться на централизованные способы организации в сети (например, топологию «звезда»).

Агенты играют в распределенных системах все более важную роль. *Программный агент* – автономный процесс, способный реагировать на среду исполнения и вызывать изменения в среде исполнения, возможно, в кооперации с пользователями или с другими агентами. Свойство, которое делает агента чем-то большим, чем процесс, – это способность функционировать автономно и, в частности, проявлять при необходимости инициативу [1]. *Кооперативный агент* – это агент, составляющий часть мультиагентной системы, то есть системы, в которой агенты, кооперируясь, выполняют некие общие задачи. Отдельно выделяют из других типов агентов мобильные агенты. *Мобильный агент* – это просто агент, у которого имеется возможность перемещаться с машины на машину, или в случае роботов – мобильный физический агент может перемещаться в пространстве.

Важный компонент платформы агентов – канал связи между агентами (AgentCommunicationChannel, ACC). В большинстве моделей мультиагентных систем агенты связываются друг с другом, пересылая сообщения.

Устойчивые к задержкам сети, DTN

Как уже было сказано выше, в некоторых средах выполнения миссии существующие TCPи большинство других транспортных протоколов не могут обеспечивать достаточно надежную коммуникацию [2]. Причина этого заключается в том, что для работы данных протоколов предполагается постоянное наличие рабочего пути между отправителем и получателем; в противном случае протокол дает сбой, и пакеты не доставляются. В некоторых сетях сквозной путь часто отсутствует. В качестве примера можно привести космическую сеть, в которой спутники LEO (Low-Earth Orbit, низкая околоземная орбита) попеременно находятся в зоне и вне зоны досягаемости наземных станций. Каждый конкретный спутник может установить связь с данной наземной станцией только в определенное время, а два спутника никогда не могут установить связь друг с другом даже через наземную станцию, так как один из них всегда находится вне зоны досягаемости этой станции. Другие примеры касаются подводных лодок, автобусов, мобильных телефонов и других устройств, условия работы или перемещения которых потенциально препятствуют надежности связи.

В качестве способа передачи данных в сетях с непостоянной связью предлагается использовать описанный в RFC4838 [3] тип сетей – устойчивые к задержкам сети (Delay-TolerantNetwork, DTN), или

распадоустойчивые сети (Disruption-TolerantNetwork, DTN). Используемый в DTNметод называется коммутацией сообщения.

Работа над DTNначалась в 2002 году, когда возникла проблема передачи пакетов в космосе. Идеи, описанные в [3] для межпланетных интерсетей, применимы и для других сетей, в которых непостоянная связь между узлами является обычным делом [4]. Архитектура DTNпредусматривает возможность хранения данных и большие задержки.

В терминологии DTNсообщение называется *посылкой*. Устройства, которые реализуют маршрутизацию посылок в DTNназываются *узлами DTN*, они оснащены запоминающими устройствами. Посылки хранятся до тех пор, пока нужный канал не станет доступным; затем происходит отправка посылок на следующий узел. В отличие от маршрутизаторов в Интернете, где ожидание в очереди может длиться от нескольких миллисекунд до пары секунд, в узлах DTNсообщения могут храниться часами. Эта особенность позволяет узлам DTNперемещаться, то есть располагаться на мобильных роботах. Перемещение вместе с хранящимися посылками может играть ключевую роль в доставке данных, иногда такой процесс называют «получение–перенос–отправка» («store – carry– forward»).

Важнейшими достоинствами DTN является:

- хранение информации в памяти до тех пор, пока не появится возможность передачи сообщения;
- возможность распределения информации между несколькими маршрутами в случае, когда контакт слишком короткий для отправки сообщения целиком;
- скорость передачи сообщений не ограничена скоростью передачи сообщения между промежуточными узлами.

Протокол Bundle

Основной протокол сети DTN – это протокол Bundle, который описан в RFC5050 [5]. Данный протокол принимает сообщения от приложения и передает их в виде одной или нескольких посылок с помощью операции получения–переноса–отправки принимающему узлу DTN. Из рисунка **Ошибка! Источник ссылки не найден.** видно, что Bundle протокол работает над транспортным уровнем TCP/IP, иными словами, TCP/IPможет использоваться в каждом из контактов для передачи посылок между узлами.

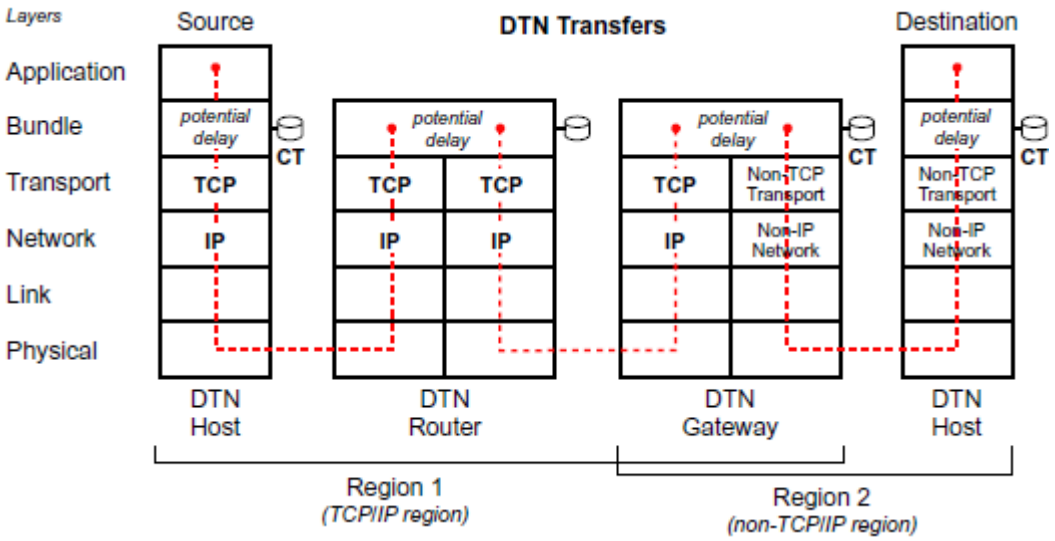


Рисунок 1 – Стек протоколов DTN

На рисунке 1 также показано, что протокол Bundle может работать поверх других протоколов – например, UDP– или даже других интерсетей. В сенсорных сетях, где ресурсы сильно ограничены, вместо TCPможет использоваться более легковесный протокол. Каждое сообщение протокола Bundlecостоит из первичного блока, который можно назвать заголовком, блока полезной нагрузки (данных) и дополнительных блоков (например, для параметров безопасности). Первичный блок начинается с поля *версия* (на 2016 год – 6), за которым следует поле *флаги*. С помощью флагов, помимо всего прочего, указывается класс обслуживания (используется в качестве отметки посылки как высокоприоритетной или низкоприоритетной) и другие обрабатывающие запросы (например, должен ли получатель подтвердить отправку).

Одной из особенностей протокола Bundleявляется введение в дополнение к очевидным полям *адрес назначения* и *получатель* поля *ответственный хранитель*. Ответственный хранитель – это сторона, которая обязана следить за тем, чтобы посылка была доставлена. Обычно в Интернете эта роль отводится источнику, так как именно он выполняет повторную передачу, если данные не доходят до пункта назначения, но в DTN узел-источник не всегда находится на связи и, следовательно, не всегда может узнать, доставлены ли данные. Для решения этой проблемы в DTNиспользуется процедура *сдачи-приемки* (custodytransfer), при которой другой узел, расположенный ближе к получателю, принимает на себя ответственность за доставку данных.

Для идентификации узлов используется гибкая система именования, основанная на унифицированном (единообразном) идентификаторе ресурса (UniformResourceIdentifiers, URI). Подобные идентификаторы дают сетям DTNвозможности маршрутизации прикладного уровня.

Симуляционная среда ONE

Для наглядного сравнения описанных выше протоколов маршрутизации в сетях DTNбыла выбрана программа ONE (Opportunistic Network Environment simulator) [6], которая была разработана специально для анализа поведения маршрутизации DTNи протоколов распределенных приложений. ONEбыл разработан в 2008 году на языке Javai распространяется как свободная программа с открытым исходным кодом.ONEподдерживает различные конфигурации симуляции, такие как тип интерфейса, модель перемещения объектов, протокол маршрутизации сообщений, карты маршрутов для различных групп объектов и другие. Кроме того, пользователь может создавать собственные протоколы маршрутизации, модели навигации объектов и т.п. для применения их в симуляционной среде ONE.

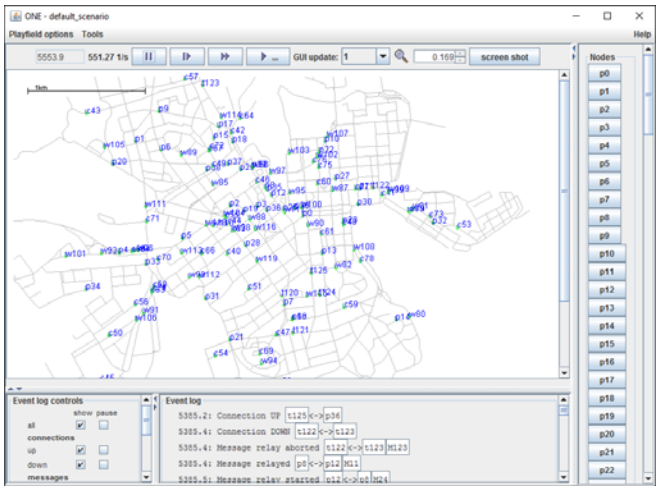


Рисунок 2 – Визуальный интерфейс программы ONE

В основе симулятора ONEлежит дискретный мультиагентный движок, который обновляет основные функции используемых модулей каждый симуляционный шаг (step).

Основные функции симулятора ONE – моделирование перемещения узлов, контакты между узлами, маршрутизация и обработка сообщений. Полученные результаты могут быть визуализированы и проанализированы при помощи генерируемых отчетов.

Движение узлов реализовано при помощи моделей движения, которые могут быть либо синтетическими моделями движения, либо заранее готовыми маршрутами. Связь между узлами зависит от их местоположения, дальности связи и скорости передачи в битах. К типам моделей передвижения относятся:

- случайное перемещение (RandomWalk, RW);
- случайное перемещение, ограниченное дорогами на карте (RandomWaypoint, RWP);
- перемещение, основанное на человеческом поведении (WorkingDayMovement, WDM).

Функция маршрутизации осуществляется при помощи моделей маршрутизации, которые решают, какие сообщения переслать, на основе существующих контактов. Сами сообщения генерируются с помощью генераторов событий. Сообщения всегда одноадресные, имеют единственный источник и одного получателя внутри симуляционного мира. В ONE реализовано шесть протоколов маршрутизации:

- Direct Delivery (DD);

- First Contact (FC);
- Spray-and-Wait;
- PRoPHET;
- MaxProp;
- Epidemic.

Узлы в ONEимеют набор базовых свойств: сетевой интерфейс, постоянное хранилище, скорость, потребление энергии и протокол маршрутизации сообщений. Модули в каждом узле имеют доступ к базовым параметрам симуляции и их состоянию, включая позицию, маршрут передвижения и текущих соседей. Эти данные позволяют реализовать, например, географическую маршрутизацию или другие контекстно-зависимые алгоритмы.

Заключение

В данной статье была описана архитектура устойчивых к разрывам сетей, применяемых для маршрутизации сообщений внутри группы автономных мобильных роботов, работающих в неизвестной среде, потенциально препятствующей надежной маршрутизации стандартными протоколами Интернет. Также была рассмотрена среда симуляции протоколов DTN – ONE, – позволяющая проводить анализ различных протоколов (встроенных или пользовательских) при задаваемых пользователем условиях. Оценивать протоколы можно на основе таких характеристик, как: процент успешно доставленных сообщений, скорость доставки, количество передач сообщений от одного узла к другому, загруженность внутренней памяти узлов и другие.

1 Э. Таненбаум и М. ван Стеен, Распределенные системы. Принципы и парадигмы, Санкт-Петербург: Питер, 2003.

2 Э. Таненбаум и Д. Уэзеролл, Компьютерные сети, Санкт-Петербург: Питер, 2012.

3 K. Fall, V. Cerf, S. Burleigh, A. Hooke, L. Torgerson, R. Durst, K. Scott и H. Weiss, «Delay-Tolerant Networking Architecture,» April 2007. [В Интернете]. Available: https://tools.ietf.org/html/rfc4838. [Дата обращения: January 2016].

4 K. Fall, «A Delay-Tolerant Network Architecture for Challenged Internets,» *SIGCOMM'03,* p. 27–34, 2003.

5 K. Scott и S. Burleigh, «Bundle Protocol Specification,» November 2007. [В Интернете]. Available: https://tools.ietf.org/html/rfc5050. [Дата обращения: January 2016].

6 A. Keränen, J. Ott и T. Kärkkäinen, «The ONE Simulator for DTN Protocol Evaluation,» *SIMUTools,* 2009.

V.V. Harlamov, S.A. Nikitin, D.V. Novitckiy, G.S. Kireeva, K.Y. Senchik, N.A. Gryaznov

EVALUATION OF NEEDLE POSITIONING ERROR WHEN INSERTED IN THE PROSTATE PHANTOM UNDER ULTRASOUND GUIDANCE USING A NEEDLE MOTION DEVICE AS PART OF A ROBOTIC BRACHYTHERAPY SYSTEM

CRDI RTC, Saint-Petersburg
s.nikitin@rtc.ru

Abstract

Adequate performance of robotic systems for brachytherapy procedures is impossible without specially developed steering algorithms providing required parameters of brachytherapy needles introduction and positioning. The aim of this study was to develop steering algorithms for the 6-DOF robot-manipulator performing probe positioning according to the data from two-dimension ultrasound scanning. Experiments were performed using prostate phantom with a tumor model inside. Results of the experiments proved the efficiency of the developed steering algorithm for the robot-manipulator using coordinates from ultrasound visualization.

Keywords: brachytherapy, robot-manioulator, ultrasound scanning, steering algorithms, prostate phantom.

Brachytherapy is one of the most effective treatment options for the localized prostate cancer. During this procedure radioactive seeds are implanted into the prostate with the hollow needles. Normally the needles with the seeds are inserted manually by the doctor. This is associated with some disadvantages [1, 2]:

- use of a rigid template for needle insertion which limits their maneuverability;
- hard to insert a needle at an angle if required;
- in dosimetry planning movement and deformation of the prostate and possible bleeding during needle insertion are not taken into account;

• the human factor in the consistency and accuracy of the needle positioning and therefore the efficiency of the procedure.

Moreover, according to the data available the final positioning accuracy of micro sources in the current clinical practice exceeds 1 mm [3]. It has been shown that displacement of the radioactive seed at a distance of more than 0.5 mm from a given location can result in organ damage and its overexposure to radiation [4]. This leads to the growing interest of designing and introduction into clinical practice of robotic systems for brachytherapy. The main goal of brachytherapy automation and robotization is to increase treatment efficiency mainly by precise positioning of the radioactive seeds with the needle insertion device according to the dosimetry plan that could be changed intraoperatively depending on the changes happening in the prostate during the needle insertion. The aim of our study was to evaluate the needle positioning error in the prostate gland phantom and to evaluate parameters of the needle insertion using original needle motion device as a part of the robotic brachytherapy system that was developed in the Central Research Institute of Robotics and Technical Cybernetics (Saint-Petersburg, Russia).

We used in the experiment robotic brachytherapy system that consists of the following elements:

- robot manipulator «UR5»(Universal Robots, Denmark) with 6 degrees of freedom;
- ultrasound scanner «Angiodin Sono/P» (BIOSS, Moscow, Russia);
- motion needle device with 2 degrees of freedom – the rotational and translational;
- robot control system conjugated with ultrasound scanner;
- prostate phantom.

Initial data for the study was the dosimetric plan of radioactive seeds locations with the specified 3D coordinates of the seeds location in the prostate phantom.

According to the given coordinates a program for the robot on the introduction of a needle into the phantom was written. After the each needle introduction coordinates of the needle tip location were determined and the mean square error was calculated. Measurement of the coordinate points corresponding to the location of the needle tip in tumor phantom was performed according to the data from the feedback channel of the robot control system at speeds in the range of 3.0 to 30.0 mm/s with a pitch of 3 mm/s, and a depth of 100 mm. The prostate phantom was made of gelatin with attenuation coefficient of 0.5 dB/cm/MHz and the speed of sound propagation of 1540 m/s. Standard medical needle for brachytherapy with a symmetrical tip was used in the study. Visualization of the trajectory of the needle movement in real-time was carried out with the help of ultrasound scanner with a biplane transrectal ultrasound probe with a resolution of 0.1 mm.

The results we obtained during the experiment were compared to the data from the clinical studies available [3]. As a result of this comparison, it was found that the use of the robotic system allows to increase the needle tip positioning in the phantom with a standard deviation x-axis $\sigma X = 0.05$ mm, y-axis $\sigma Y = 0.05$ mm, z-axis $\sigma Z = 0.06$ mm and with an arithmetic average error x-axis $\Delta x=0.14$ mm, y-axis $\Delta y=0.29$ mm, z-axis $\Delta z=0.18$ mm.

Thus, encouraging data have been obtained on increase in the positioning accuracy of the needle tip in prostate phantom using the robotic system for both low-dose high-dose brachytherapy procedures. The study results for the point with X-coordinates=100.0 mm, Y-coordinates=30.0 mm, Z-coordinates=40.0 mm are presented in table 1.

Table 1.Standard error of the tip needle positioning in the prostate phantom

Needle insertion parameters			Mean error									Needle type
№	V, mm/sec	Needle insertion depth, mm	$X\pm3\sigma_X$, mm	X_{mean}, mm	σ_X, mm	$Y\pm3\sigma_Y$, mm	Y_{mean}, mm	σ_Y, mm	$Z\pm3\sigma_Z$, mm	Z_{mean}, mm	σ_Z, mm	
1	3.0	100.0	100.11±1.34	99.85	0.44	30.12±1.30	30.13	0.43	40.00±0.88	40.07	0.29	The tip is symmetric D = 1.16 mm L = 150.00 mm α = 15º
2	6.0		100.13±1.34			30.15±1.30			39.95±0.88			
3	9.0		99.86±1.34			30.26±1.30			39.90±0.88			
4	12.0		100.18±1.34			30.31±1.30			40.22±0.88			
5	15.0		100.25±1.34			29.62±1.30			40.26±0.88			
6	18.0		99.70±1.34			30.39±1.30			39.68±0.88			
7	21.0		99.65±1.34			29.54±1.30			40.36±0.88			
8	24.0		100.47±1.34			29.50±1.30			40.38±0.88			
9	27.0		99.20±1.34			30.65±1.30			40.43±0.88			
10	30/0		98.99±1.34			30.84±1.30			39.52±0.88			

As a result of the experiments we obtained data that allow us to say with confidence that the developed robotic system can improve the accuracy of the needle positioning and therefore the seeds positioning in the tumor by 2 times compared to the standard methods and equipment for needle insertion. Also the basic functional requirements for robotic systems for brachytherapy were determined:

- visualization (in our case, using ultrasound) of each seed locations and the needle tip location in real time;
- the seed positioning with an accuracy of no less than 0.5 mm;
- correction of needle motion in automatic mode [5].

In the future, we plan to explore methods of introducing flexible brachytherapy needles along a curved path in order to minimize soft tissues injury.

1. Lopota A.V., Gryaznov N.A., Velichko O.V. et al. The Existing Methods for Motion Control of Flexible Needles along a Curved Path as Part of Robotic Systems for Brachytherapy. American Journal of Applied Sciences. 2015;13(1):73–79.
2. Gryaznov N.A., Senchik K.Y., Velichko O.V. et al. Robotic systems for prostate cancer brachytherapy (robot-assisted systems). Indian Journal of Science and Technology. 2015;8:1–6.
3. Venselaar J., Meigooni A.S., Batlas D. et. al. Comprehensive Breachytherapy: Physical and Clinical Aspects. USA: CRC Press, 2013 535 pp.
4. Kuznetsov M. A. Dosimetric and radiation-hygienic maintenance of prostate cancer brachytherapy with sealed radionuclide sources. Lomonosov Moscow State University. 2013. 1-19.
5. Yu Y., Podder T.K., Zhang Y.D. et al. Robotic system for prostate brachytherapy. Comput. Aided Surg. 2007;12:366–370.

В.В. Харламов, С.А. Никитин, Д.В. Новицкий, Г.С. Киреева, К.Ю. Сенчик, Н.А. Грязнов

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ПРИ ВВЕДЕНИИ ИГЛЫ В ФАНТОМ ПРЕДСТАТЕЛЬНОЙ ЖЕЛЕЗЫ ПОД КОНТРОЛЕМ УЗИ С ПРИМЕНЕНИЕМ УСТРОЙСТВА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ИГЛ В СОСТАВЕ РОБОТИЗИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ БРАХИТЕРАПИИ

ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург
s.nikitin@rtc.ru

Аннотация

Адекватная работа роботизированных систем, предназначенных для автоматизации процесса брахитерапии, невозможна без специальных алгоритмов их управления, которые, в конечном счете, обеспечивают необходимые параметры введения и позиционирования брахитерапевтических игл. Целью проведенного авторами исследования являлась разработка алгоритмов управления шести-координатным роботом-манипулятором для позиционирования зонда по данным двухмерного ультразвукового сканирования. Эксперименты проводились на фантоме предстательной железы, в состав которого была введена модель опухоли. По результатам натурных экспериментов доказана работоспособность алгоритма управления робота-манипулятора по координатам УЗИ-сканирования.

Ключевые слова: брахитерапия, робот-манипулятор, ультразвуковое сканирование, алгоритмы управления, фантом предстательной железы.

Брахитерапия является одним из наиболее эффективных методов лечения локализованного рака предстательной железы. Данный метод заключается в имплантации радиоактивных микроисточников в предстательную железу с помощью полых игл, и традиционно осуществляется врачом вручную. Это обуславливает ряд недостатков [1, 2]:

- использование фиксированного шаблона для введения игл, что ограничивает маневренность;
- сложность введения иглы под углом в случае необходимости;
- при дозиметрическом планировании не учитываются факторы движения и деформации предстательной железы и кровотечения, которые имеют место при введении игл;
- влияние человеческого фактора на постоянство, точность и эффективность проведения процедуры.

К тому же, по имеющимся данным итоговая погрешность позиционирования микроисточников в сложившейся клинической практике составляет более 1 мм [3]. В то же время показано, что смещение

микроисточника на расстояние более чем 0,5 мм от заданного местоположения может приводить переоблучению и повреждению органа [4]. Все это приводит к тому, что все большую актуальность приобретает разработка роботизированных систем для проведения процедуры брахитерапии. Эффективность лечения при брахитерапии в первую очередь зависит от равномерного распределения дозы облучения, которое достигается за счет точного расположения микроисточников в соответствии с планом операции. Любое смещение микроисточника от заданного положения при имплантации приводит к негативным эффектам.

Целью проведенного исследования являлась оценка среднеквадратичной погрешности позиционирования кончика иглы в фантоме предстательной железы человека с использованием разработанной роботизированной системы для проведения процедуры брахитерапии в сравнении с традиционными методиками и техническими средствами.

Для проведения эксперимента использовалась роботизированная система для брахитерапии в составе:

- робот-манипулятор «UR5»(UniversalRobots, Дания) с шестью степенями подвижности;
- устройство перемещения игл с двумя степенями подвижности – вращательной и поступательной, (УПИ);
- УЗИ сканер «Ангиодин Соно/П» («БИОСС», Москва);
- система управления сопряжённая с УЗИ сканером;
- фантом предстательной железы.

Исходными данными для исследования являлся дозиметрический план расположения микроисточников с заданными трёхмерными координатами расположения микроисточников в фантоме предстательной железы.

По данным координатам составлялась программа для робота по введению иглы в фантом. После каждого введения иглы проводились измерения координат местоположения кончика иглы и рассчитывалась среднеквадратическая погрешность. Измерение координат точек, соответствующих местоположению кончика иглы в фантоме опухоли осуществлялось по данным с канала обратной связи системы управления робота при скоростях движения в диапазоне от 3,0 до 30,0 мм/с с шагом 3 мм/с, и на глубину 100 мм. В качестве фантома предстательной железы использовался пищевой желатин с коэффициентом затухания 0.5 дБ/см/МГц и скоростью распространения звука 1540 м/с. Для исследований использовалась стандартная медицинская инъекционная игла для брахитерапии с симметричным кончиком. Визуализация траектории движения иглы в режиме реального времени осуществлялась с помощью УЗИ сканера с биплановым трансректальным УЗИ датчиком с разрешающей способностью – 0,1 мм.

В результате проведения исследования были получены данные, которые сравнивались с результатами клинических исследований [3]. В результате сравнения было установлено, что использование роботизированной системы позволило повысить точность позиционирования кончика иглы в фантоме при среднеквадратичном отклонении по оси xσ_X = 0,05 мм, по оси σ_Y = 0,05 мм, по оси zσ_Z = 0,06 мм среднеарифметическая погрешность составила по оси x Δ_x=0,14 мм, по оси y Δ_y=0,29 мм, по оси z Δ_z=0,18 мм. Таким образом, были получены обнадёживающие данные по повышению точности позиционирования кончика иглы в фантоме предстательной железы с использованием роботизированной системы как для низкодозной, так и для высокодозной процедуры брахитерапии. Результаты исследований для точки с координатами X=100,0 мм; Y=30,0 мм; Z=40,0 мм представлены в таблице 1.

Таблица 1. -Среднеквадратическая погрешность позиционирования кончика иглы в фантоме предстательной железы

Параметры введения иглы			Среднеквадратическая погрешность									Тип иглы
№	V, мм/с	Глубина введения иглы, мм	X±3σ_X, мм	$X_{ср}$, мм	σ_X, мм	Y±3σ_Y, мм	$Y_{ср}$, мм	σ_Y, мм	Z±3σ_Z, мм	$Z_{ср}$, мм	σ_Z, мм	
1	3,0	100,0	100,11±1,34	99,85	0,44	30,12±1,30	30,13	0,43	40,00±0,88	40,07	0,29	Кончик – симметричный D = 1.16 мм L = 150.00 мм α = 15º
2	6,0		100,13±1,34			30,15±1,30			39,95±0,88			
3	9,0		99,86±1,34			30,26±1,30			39,90±0,88			
4	12,0		100,18±1,34			30,31±1,30			40,22±0,88			
5	15,0		100,25±1,34			29,62±1,30			40,26±0,88			
6	18,0		99,70±1,34			30,39±1,30			39,68±0,88			
7	21,0		99,65±1,34			29,54±1,30			40,36±0,88			
8	24,0		100,47±1,34			29,50±1,30			40,38±0,88			

9	27,0		99,20±1,34			30,65±1,30			40,43±0,88			
10	30,0		98,99±1,34			30,84±1,30			39,52±0,88			

В результате проведенного исследования нами были получены данные, которые позволяют с уверенностью сказать, что разработанная роботизированная система позволяет повысить точность позиционирования иглы, а следовательно и точность позиционирования микроисточников в опухолевой области по сравнению с традиционными методами и техническими средствами введения игл более, чем в 2 раза. Также, были определены основные функциональные требования, предъявляемые к роботизированным системам для брахитерапии:

- возможность визуализации (в нашем случае посредством УЗИ) мест расположения каждого микроисточника и кончика иглы в режиме реального времени;
- имплантация микроисточников с погрешностью не хуже, чем 0,5 мм;
- возможность корректировки движения иглы в автоматическом режиме [5].

В дальнейшем мы планируем исследовать методы введения гибких игл для брахитерапии по криволинейной траектории с целью минимизации травмирования мягких тканей.

1. LopotaA.V., GryaznovN.A., VelichkoO.V. etal. The Existing Methods for Motion Control of Flexible Needles along a Curved Path as Part of Robotic Systems for Brachytherapy. American Journal of Applied Sciences. 2015;13(1):73–79.
2. Gryaznov N.A., Senchik K.Y., Velichko O.V. et al. Robotic systems for prostate cancer brachytherapy (robot-assisted systems). Indian Journal of Science and Technology. 2015;8:1–6.
3. Venselaar J., Meigooni A.S., Batlas D. et. al. Comprehensive Breachytherapy: Physical and Clinical Aspects. USA: CRC Press, 2013 535 pp.
4. Kuznetsov M. A. Dosimetric and radiation-hygienic maintenance of prostate cancer brachytherapy with sealed radionuclide sources. Lomonosov Moscow State University. 2013. 1-19.
5. Yu Y., Podder T.K., Zhang Y.D. et al. Robotic system for prostate brachytherapy. Comput. Aided Surg. 2007;12:366–370.

I.B. Pryamitsyn, A.U. Sedov, A.L. Korotkov, A.V. Rogov

ASPECTS OF ELECTRICAL COMMUNICATIONS ROUTING IN SMALL-SIZED ROTARY JOINTS

CRDI RTC, Saint-Petersburg
pib@rtc.ru

Abstract

This article describes different ways of difficult mechatronic systems' layouts depending on requirements for electrical communications routing. The algorithm for choosing a method of electrical communications routing is presented.

Keywords: mechatronic hinge, electrical communication, construction of algorithms, wires.

И.Б. Прямицын, А.Ю. Седов, А.Л. Коротков, А.В. Рогов

ОСОБЕННОСТИ ПРОКЛАДКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОММУНИКАЦИЙ В ПОДВИЖНЫХ ШАРНИРАХ МАЛЫХ ГАБАРИТНЫХ РАЗМЕРОВ

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

Аннотация

В статье рассмотрены варианты компоновки сложных мехатронных систем в зависимости от требований к прокладке электрических коммуникаций. Приведен алгоритм выбора способа прокладки электрокоммуникаций.

Ключевые слова: мехатронный шарнир , электрические связи , построение алгоритмов , проводов.

Одной из основных задач при проектировании сложных мехатронных систем является прокладка электрических коммуникаций. Существуют несколько конструктивных решений задачи – внешняя проводка с компенсацией длины проводов для обеспечения необходимой подвижности шарнира или

скрытая внутри корпуса шарнира с применением токосъемников. Прокладка электрических коммуникаций внутри корпуса шарнира является наиболее трудной задачей, особенно, при необходимости прокладки проводов через механические шарниры и передачи. Для реализации такой проводки чаще всего используют токосъемники (контактные кольца).

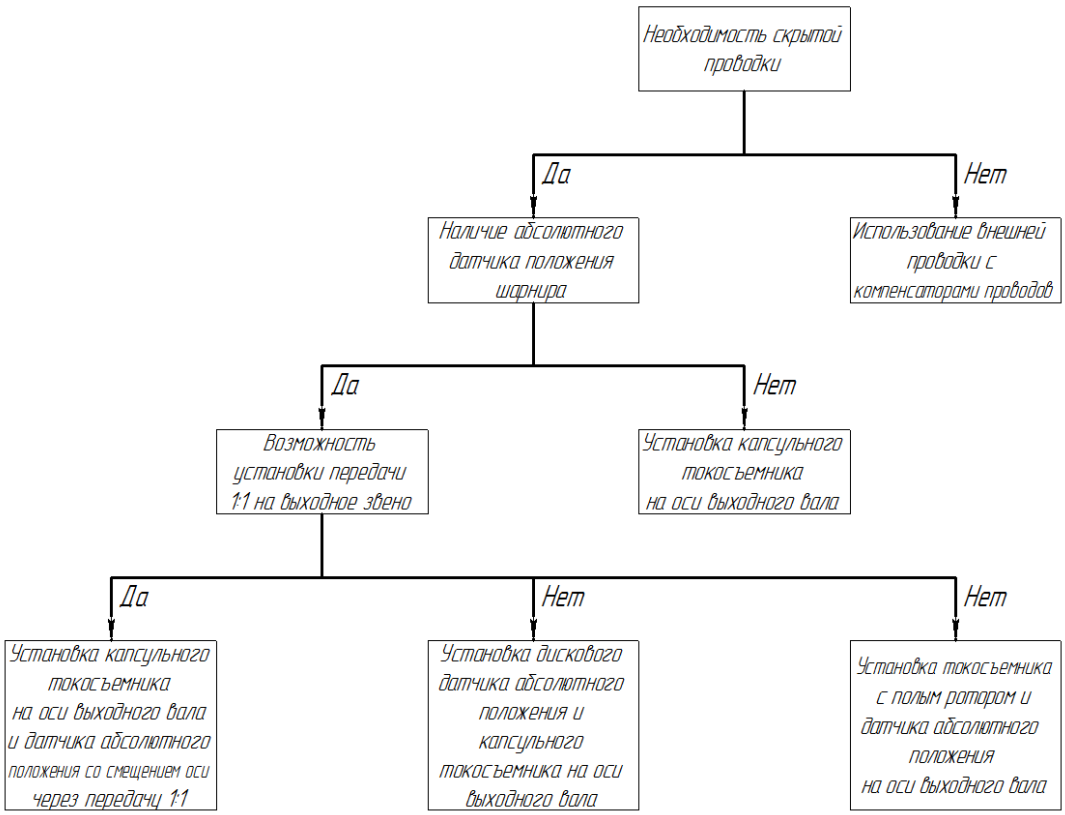


Рисунок 1 – Алгоритм выбора способа прокладки электрокоммуникаций

На рисунке 1 представлен алгоритм выбора конструктивного решения реализации электрической проводки для шарниров малых габаритных размеров:

1) использование внешней проводки (для компенсации подвижности шарниров используются петли с запасом провода). Главным достоинством этого решения является простота конструкторского и технологического решения. К недостаткам такой системы можно отнести ограничение подвижности шарнира в пределах запаса компенсатора, неэстетичный вид конечного изделия, высокая вероятность повреждения внешней оплетки провода;
2) при использовании скрытой проводки, чаще всего, существуют трудности совмещения абсолютного датчика положения шарнира и токосъемника, т.к. эти два конструктивных элемента, как правило, необходимо расположить на оси выходного вала. При отсутствии абсолютного датчика положения проблема размещения исключена и, чаще всего, применяют капсульные токосъемники;
3) существуют конструктивные элементы, такие как дисковые датчики абсолютного положения, и токосъёмники с полым валом, но модельный ряд таких устройств ограничен, и подбор этих элементов определяется при решении конкретной поставленной задачи. Использование одного из этих компонентов снимает ограничение установки на центральной оси другого. При невозможности использования данных устройств, применяют совмещение капсульного токосъемника с абсолютным датчиком при смещении оси последнего через паразитную передачу с передаточным отношением 1:1 (на точность абсолютного датчика влияет люфт передачи).

На рисунке 2 представлен пример компоновки мехатронного шарнира, сформированного по принципу комбинирования капсульного токосъемника с дисковым датчиком абсолютного положения.

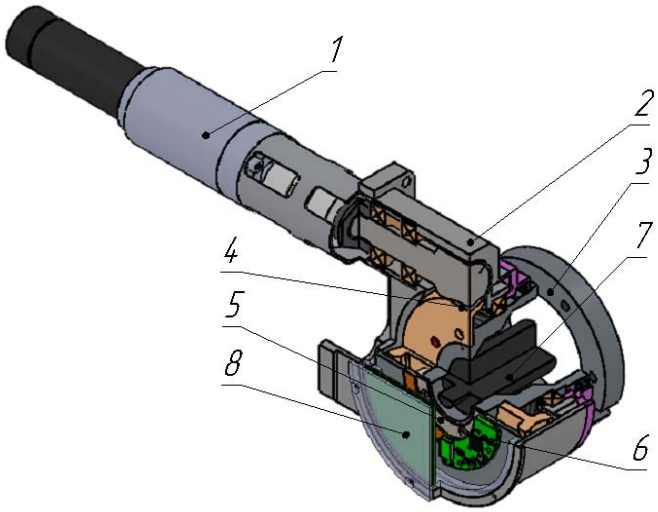


Рисунок 2 – Вариант компоновки многооборотного шарнира с дисковым датчиком абсолютного положения и капсульным токосъемником

Мотор-редуктор поз.1, закрепленный на корпусе поз 2., приводит в движение выходной вал поз 3, через червячную передачу поз.4. Дисковый датчик абсолютного положения представляет собой магнитный диск поз.5, закрепленный на валу поз.4, и считывающую головку поз.6, закрепленную на корпусе поз.2. В центре вала поз.4 установлен капсульный токосъемник поз.7. На корпусе также установлена плата поз.8, управляющая мотор-редуктором.

Как видно из рисунка, данное техническое решение представляет собой многооборотный шарнир с абсолютным датчиком угла поворота. Такойшарнирможетбытьосновоймногостепенногоманипулятора.

I.E. Novikov

SOFTWARE COMPLEX FOR MATHEMATICAL SIMULATION OF PROCESSES OF TRANSFER AND REGISTRATION OF GAMMA-RADIATION FOR DEVELOPMENT OF SYSTEMS FOR THE EARTH'S SURFACE REMOTE RADIATION MONITORING

CRDI RTC, Saint-Petersburg
novikov@rtc.ru

Abstract

Mathematical methods and unique set of specialized software tools that implement them are developed to obtain apparatus spectrum and characteristics of gamma-radiation field near the boundary between two semi-infinite media of the "air - condensed matter" type by the Monte-Carlo methods, which are necessary for design and calibration of remote radiation monitoring systems including airborne and ground-based options.

Developed software tools allow to consider a wide range of possible measurement conditions, including one-dimentional and three-dimentional geometry of the radiation source, different types of penetration, various compositions and density of media, presence of snow cover, radioactive stains, etc.

Keywords: Remote radiation monitoring; environmental media monitoring, gamma-radiation spectrometers, Monte-Carlo methods, local gamma-radiation sources search, gamma-radiation dose rate measurment.

И.Э. Новиков

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА И РЕГИСТРАЦИИ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ СИСТЕМ ДИСТАНЦИОННОГО РАДИАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ

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

Аннотация

Разработаны математические методы и реализующий их уникальный комплекс специализированных программных средств для получения методами Монте-Карло аппаратурных

спектров и характеристик поля гамма-излучения вблизи границы раздела двух полу бесконечных сред типа «воздух – конденсированная среда», необходимых для проектирования и градуировки систем дистанционного радиационного мониторинга включая авиационный и наземный варианты.

Разработанные программные средства позволяют учесть широкий диапазон возможных условий измерений, включая одномерную и трехмерную геометрию источника излучения, различные типы его заглубления, различный состав и плотности сред, наличие снежного покрова, радиоактивных пятен и т.д.

Ключевые слова: дистанционный радиационный мониторинг; контроль природных сред; спектрометры гамма-излучения; методы Монте-Карло; поиск локальных источников гамма-излучения; измерение мощности дозы гамма-излучения.

Разработаны математические методы и реализующий их комплекс специализированных программных средств для получения методами Монте-Карло аппаратурных спектров и характеристик поля гамма-излучения вблизи границы раздела двух полу бесконечных сред типа «воздух – конденсированная среда», необходимых для проектирования и градуировки систем дистанционного радиационного мониторинга (ДРМ), включая авиационный и наземный варианты [1,2].

Разработка является результатом обобщения опыта многолетней совместной работы специалистов ЦНИИ РТК и МИФИ по расчету характеристик поля гамма-излучения близи границы раздела двух сред для создания систем авиационного радиационного мониторинга поверхности Земли и систем мягкой посадки. Разработанные программные средства позволяют учесть широкий диапазон возможных условий измерений, включая одномерную и трехмерную геометрию источника излучения, различные типы его заглубления, различный состав и плотности сред, наличие снежного покрова, радиоактивных пятен и т.д.

Актуальность разработки обусловлена необходимостью повышения тактико-технических характеристик существующих систем ДРМ поверхности Земли и необходимостью разработки новых современных систем для решения этой задачи.

Ценность результатов работы заключается в том, что созданный комплекс специализированных программных средств отечественной разработки и реализованные в нем математические методы, непосредственно предназначены для решения класса задач, связанных с получением методом Монте-Карло аппаратурных спектров для градуировки систем авиационного радиационного мониторинга поверхности Земли. Следует отметить, что производится расчет не только интегральных, но и дифференциальных характеристик поля излучения.

Практическая значимость работы определяется возможностью проектирования систем ДРМ поверхности Земли без использования для этих целей дорогостоящих и вредных для здоровья людей радионуклидных источников, а также возможностью получать аппаратурные спектры и характеристики поля практически для любого гамма-излучающего радионуклида при любой пространственной конфигурации, предусмотренной типовыми геометриями, реализованными в программном пакете. При этом существует возможность использовать полученные результаты на ранних этапах проектирования измерительных систем.

Правильность выбранных решений подтверждается практическим опытом использования результатов в разработках систем измерения характеристик поля гамма- излучения вблизи границы раздела двух сред типа «воздух – конденсированная среда», а также результатами их испытаний, сравнением с результатами расчетов, выполненных по другим программам, а также данными, известными по открытой литературе [1,2,10].

В ЦНИИ РТК в течение более чем 30 лет ведутся разработки систем и комплексов ДРМ для экологических целей и ликвидации последствия ядерных инцидентов. В результате этих работ были спроектированы, приняты на снабжение и серийно произведены ряд приборов и аппаратурно-программных комплексов для авиационного радиационного мониторинга поверхности Земли.

В этих разработках требовалось обеспечить возможность проводить измерения при ликвидации последствий ядерных инцидентов (например, для ситуации, возникшей в течение первых недель после аварии на Чернобыльской АЭС, 1986 г.) [4, 5] Практически это значит, что измеряемый источник излучения образован совокупностью техногенных радионуклидов, список которых может быть априори неизвестен.

Авария на атомной электростанции «Фокусима-1» в Японии в 2011 году показала, что в настоящее время контроль за радиоактивными веществами и их воздействием на окружающую среду остается весьма актуальной задачей, несмотря на значительные меры безопасности, применяемые в атомной энергетике и в других областях, имеющих дело с радиоактивными веществами. Одним из путей решения является ДРМ. К его преимуществам относятся возможность проводить экспрессную оценку радиационной обстановки больших территорий и измерения без непосредственного пребывания

персонала в опасной зоне, особенно в тех случаях, когда непосредственный доступ в зону заражения затруднен из-за завалов, пожаров и других осложняющих факторов.

Под дистанционными здесь подразумеваем измерения, при которых область, для которой проводится измерение характеристик поля излучения, и область расположения детектора отстоят друг от друга в пространстве. При этом прямо измеряемые или косвенно оцениваемые характеристики поля излучения испытывают значительные трансформации за счет взаимодействия излучения со средой своего распространения, расположенной между этими областями.

Для определения искомых характеристик поля излучения методами прикладной гамма-спектрометрии, (частным случаем которой является спектрометрический ДРМ), необходимо решить три задачи: непосредственно экспериментально выполнить рабочее измерение аппаратурного спектра, решить прямую и обратную задачи спектрометрии. Прямая задача – получение, (как правило, методами моделирования), априорной спектрометрической информации при известных условиях измерения, (соответствующих реальному эксперименту), и характеристиках поля для последующего сравнения с результатами реального эксперимента; обратная задача – оценка искомых характеристик поля излучения на основании сравнения результатов проведенных реальных измерений и априорной информации [4]. В определенном смысле результаты решения прямой задачи используются как образец для сравнения с результатами рабочего измерения при решении обратной задачи. Подразумевается, что модель, используемая для получения априорной информации в результате решения прямой задачи, в достаточной мере соответствует реальным условиям эксперимента. В нашем случае в результате эксперимента непосредственно производится измерение спектрального распределения амплитуды электрических импульсов на выходе блока детектирования в ответ на воздействие поля излучения; при этом амплитудаэлектрического импульса связана с поглощенной в чувствительном объеме детектора энергии, переданной в результате взаимодействия с гамма–квантом; обратная задача решается с помощью специальных алгоритмов обработки спектрометрической информации, а прямая с помощью описываемого программного пакетаматематического моделирования процессов переноса и регистрации

В открытой литературе встречаются описания программ и готовых решений для определения интегральных характеристик поля гамма-излучения в протяженных средах [10] и программ, которые могут использоваться для моделирования процессов переноса и регистрации гамма излучения в лабораторных условиях [3]. Попытки непосредственного использования этих средств для получения априорной спектрометрической информации для задач ДРМ в некоторых случаях не приводят к положительному результату, так как недостаточно учтена специфика соответствующих условий измерений.

После аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 г. стала очевидна тенденция постоянного возрастания уровня требований к аппаратуре ДРМ (в частности авиационного) по качеству работы, условиям применения, числу обнаруживаемых нуклидов, что требует от разработчиков наличия соответствующих средств и методов проектирования. Весьма актуальной остается и проблема градуировки средств ДРМ, особенно авиационных. Натурные испытания при этом являются весьма дорогостоящими и требуют применения источников гамма-излучения высокой активности, опасных для здоровья людей и способных загрязнить окружающую среду, в ряде случаев подобные испытания принципиально невозможны. Использовать аттестованные естественно-природные площадки для градуировки аппаратуры в нашем случае не представляется возможным, так как необходимо иметь возможность проводить измерения для большого числа техногенных радионуклидов, некоторые из которых быстро распадаются и в естественных условиях не встречаются.

Возможным способом решения этой проблемы является применение методов математического моделирования (методов Монте-Карло). Ситуация осложняется тем, что данный класс задач имеет свою существенную специфику [1], которая, может не учитываться в достаточной мере в известных программах широкого профиля (в частности MCNP), что в ряде случаев приводит к значительным сложностям или невозможности их практического применения для этих целей. Также необходимо учитывать возможные сложности при получении лицензии на использование таких программных продуктов.

Изначально отечественные исследования в области радиационного мониторинга, включая, дистанционные проводились в рамках атомного проекта в СССР. Можно выделить два смежных направления: во-первых,ориентированное на работу с естественной радиацией земной поверхности [4] и связанное изначально с решением геологических задач, в частности поиском урановых и других месторождений полезных ископаемых; во-вторых, ориентированное на работу с радиоактивными нуклидами искусственного происхождения и связанное с загрязнением окружающей среды и критических объектов в результате взрывов ядерных зарядов или других ядерных инцидентов, в

частности авариями на ядерном объекте типа АЭС. Второе направление активно освещалось в трудах академикаЮ.А. Израэля [10]. После событий, связанных с аварией на Чернобыльской АЭС в 1986 г.[4,5]., получил развитие новый импульс в развитии конкретно экологического направления связанного с ликвидацией последствий крупных аварий на ядерных объектах. Были переосмыслены прежние подходы и получен большой опыт практической работы в этом направлении. Крайне положительную роль для развития этого направления сыграли такие факторы как: наличие общенациональной сверхзадачи, преодоление межведомственных барьеров и политика гласности в этом вопросе. В результате сформировалось новое понимание целей исследований и разработок в этой области, в частности, понимание необходимости углубленного комплексного подхода к изучению радиационной обстановки, разработки новых систем и комплексов контроля радиационной обстановки и соответствующего обеспечение для них. С учетом опыта ликвидации последствий этой аварии в ЦНИИ РТК был разработан уникальный комплекс радиационной разведки и поиска источников ионизирующих излучений в состав, которого входили воздушный и наземный комплексы радиационной разведки, а также наземный вычислительный комплекс; в ходе этих работ обозначилось направление исследований, связанное с решением специфических для аппаратуры ДРМ вопросов по ее градуировке и разработке алгоритмов обработки спектрометрической информации. К сожалению, эти работы были прерваны в связи с экономическими трудностями и распадом СССР. В дальнейшем некоторые работы в этом направлении были локально продолжены в частном порядке отдельными организациями. В частности сотрудниками ЦНИИ РТК и МИФИ был разработан описываемый здесь уникальный программный комплекс для проектирования и градуировки спектрометрической аппаратуры ДРМ.

В результате обобщения уникального опыта, полученного при разработке мобильных комплексов спектрометрического ДРМ, проводимой с учетом результатовликвидации последствийаварии на Чернобыльской АЭС в 1986 г., была разработана концепция повышения эффективности ДРМ и процесса проектирования реализующих его измерительных систем за счет конструктивного учета специфики условий измерений [1,2,11], разработки и применения соответствующих методов математического моделирования и обработки спектрометрической информации [12,13]. Данная концепция была реализована для методов дистанционного обнаружения локальных источников гамма-излучения и дистанционного измерения мощности дозы гамма-излучения от радиоактивного загрязнения местности на базе многоканальных спектрометрических сцинтилляционных блоков детектирования [1,2,11,12,13]. Применительно к вопросам градуировки аппаратуры ДРМ реализация данной концепции подразумевает необходимость разработки специализированного программного средства оптимизированного для решения конечной измерительной задачи и корректно учитывающей условия и специфику процесса измерения. С другой стороны, при реализации такого специализированного программного средства можно избежать необходимости решения существенно более сложных вопросов, возникающих например, при корректном моделировании процессов переноса и регистрации излучения в лабораторных условий измерения. В частности, нет необходимости создавать развитый графический интерфейс и учитывать сложные процессы переноса заряженных частиц, можно ограничиться простыми и известными моделями взаимодействия гамма-излучения с веществом [3]. В результате грамотного учета специфики решаемой задачи можно получить достаточно эффективноеи удобное в работе средство градуировки аппаратуры спектрометрического ДРМ, не требующее использования универсальных зарубежных программ моделирования (типа MCNP), и привлечения для своей разработки специалистов слишком высокого уровня.

Характерное для решения этого класса задач (размеры детектора малы по сравнению с пробегом излучения в воздухе и расстоянием источник-детектор) применение схемы расчета на основе классической локальной оценки потока дает расходящуюся дисперсию результата, (при существовании конечного математического ожидания) поскольку точка расположения детектора находится в области переноса излучения [3,7]. (В теории методов Монте-Карло «оценкой» принято называть специальным методом разыгрываемую случайную величину, математическое ожидание которой равно значению искомого функционала [3], в данном докладе термин «оценка» употребляется в этом значении).

В фундаментальной работе [7] приведены различные способы расчета и результаты отечественных и зарубежных экспериментальных и расчетных исследованийхарактеристик поля гамма-излучения вблизи границы раздела двух полу бесконечных сред типа «воздух – конденсированная среда», близкие к нашим задачам.

В рассматриваемом программномкомплекс используется специально разработанный для таких задач с трехмерным источником излучения конечного размера метод псевдолокальной оценки потока излучения для детектора конечных размеров, который для больших расстояний между точкой столкновения и детектором асимптотически совпадает с обычной локальной оценкой потока, при

приближении точки столкновения к детектору оценка всегда остается ограниченной и, следовательно, обладает конечной дисперсией [1,2,11].

Разработанный программный комплекс в течение ряда лет применяется в ЦНИИ РТК для проектирования и градуировки аппаратуры ДРМ [1,2,11,13].В комплекс входят семейство программ GRAIN для расчета дифференциальных характеристик поля излучения в области расположения детектора и программа DINAM для расчета аппаратурных спектров применяемых блоков детектирования. При расчете характеристик поля излучения в зависимости от условий используются разнообразные модификации метода Монте-Карло [1,2].

Программы семейства GRAIN (GRound-Air INterface) предназначены для расчета характеристик поля фотонного излучения вблизи границы раздела воздух-конденсированная среда (автор — М.П. Панин, МИФИ).

Программа GRAIN-1 рассчитывает поле излучения для одномерной плоской многослойной геометрии. В качестве оценки искомого функционала используется оценка по пробегу [1,3,7]. Это означает, что при каждом розыгрыше траектории частицы между точками взаимодействия со средой подсчитывается длина отрезка траектории, находящегося внутри детектора. Плотность потока частиц, усредненная по объему детектора, равна математическому ожиданию суммарной длины траектории в единице объема детектора:

Физическая модель взаимодействия излучения с веществом, используемая в программах серии GRAIN, учитывает следующие эффекты: фотопоглощение, комптоновское рассеяние, образование электрон- позитронных пар с генерацией аннигиляционного излучения. Библиотечный файл содержит все необходимые для расчетов сечения взаимодействия и константы для воздуха, воды, грунта и бетона, кварцевого стекла и железа. В качестве источника информации используются данные из [9], (в настоящее время эта база данных содержится в Интернете).

Химический состав и плотность грунта и воздуха, учтенных в библиотечном файле, следующие (массовые %):

Грунт: O — 43 %, H — 2 %, C — 11 %, Al — 14 %, Si — 20 %, Ti — 1 %, Fe — 9 %, плотность: 1,625 г/см3

Воздух: O — 23,2 %, N — 75,5 %, Ar — 1,3 %, плотность: $1{,}29\times10^{-3}$ г/см^3.

Учтены наиболее известные типы заглубления радиоактивных источников: дельта-источник, экспоненциальное и трапециидальное; возможно задавать их суперпозицию в качестве модели распределения источники излучения по глубине. Начальный спектр излучения источника может задаваться монолинией или спектром определенного радиоактивного нуклида.

Программа GRAIN-3 рассчитывает характеристики поля излучения для одномерной плоской трехслойной геометрии (для учета снежного покрова) среды распространения излучения и трехмерного источника конечного размера. Сечение источника излучения в горизонтальной плоскости представляет собой прямоугольник или эллипс с масштабированным центральным отверстием. Детектор расположен на расстоянии десятков или сотен метров от источника конечного размера, собственные размеры детектора много меньше расстояния до источника. Применение классической схемы расчета локальной оценки по дифференциальным потокам из точек рассеяния дает в этом случае расходящуюся дисперсию результата. Для расчета характеристик поля излучения в области, где расположен детектор, используется специально разработанный для этой задачи вышеупомянутый метод псевдолокальной оценки по дифференциальному потоку с оценкой по пробегу в области детектирования [3,7]. Данная оценка представляет собой модификацию оценки по пробегу, применяемой для детекторов с конечным фазовым объемом.

При описании детектора используется осевая симметрия. Детектор задается в виде прямого кругового цилиндра конечных размеров. Для каждой поверхности цилиндра подсчитывается среднее энергетически-угловое распределение (берется угол направления движения частицы с нормалью к поверхности в точке пересечения этой поверхности). Далее эта информация используется для вычисления аппаратурных спектров детекторов, как реакция на воздействие поля гамма-излучения с помощью программы DINAM.

Программа для имитационного моделирования систем детектирования гамма-излучения DINAM (автор — И.Э. Новиков ЦНИИ РТК) позволяет на основе метода Монте-Карло решать задачи моделирования процессов переноса и регистрации гамма-фотонов в диапазоне энергий от 10 кэВ до 3 МэВ, а также получать функцию отклика детектора в виде спектра импульсов на выходе амплитудно-цифрового преобразователя. Функция отклика детектора может быть вычислена для локальных источников излучения или по энергетически-угловому распределению поля гамма-излучения в области расположения системы детектирования. Отличительной чертой DINAM является оригинальный

геометрический модуль, который обеспечивает возможность построения геометрических моделей конструкций повышенной сложности из комбинации объемных геометрических примитивов. Геометрический модуль является специализированным средством, оптимизированным по скорости расчетов для решения указанной задачи. Получено Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ на территории РФ № 2010610416 от 11.01.2010 г.[8].

Результаты работы использованы при разработке аппаратно-программных комплексов ДРМ поверхности Земли, выполненных в ЦНИИ РТК, в том числе при проектировании и градуировке аппаратуры контроля радиационной обстановки для бортового вертолетного комплекса «Астрахань» (2007 г.). Комплекс прошел государственные приемо-сдаточные испытания (в том числе летные), получены положительные результаты.[13]

1. Сухоруков А.И., Хисматов И.Ф., Новиков И.Э. Основы теории аэрокосмического радиационного мониторинга Земли. Ч. 1. Физические основы радиационного дистанционного зондирования Земли. М.: Изд-во ВУНЦ ВВС «ВВА им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», 2011. 312 с.
2. Новиков И.Э. Пакет программ математического моделирования процессов переноса и регистрации гамма-излучения систем авиационного радиационного мониторинга // Научно-технический и производственный журнал "Вестник компьютерных и информационных технологий" № 8, 2013 С.16-21.
3. Панин М.П. Моделирование переноса излучения. М.: МИФИ, 2008. 212 с
4. Коган Р.М., Назаров И.М., Фридман Ш.Д. Основы гамма-спектрометрии природных сред. 3-е изд. М.: Энергоатомиздат, 1991. 232 с.
5. Чернобыль: радиоактивное загрязнение природных сред / Ю.А. Израэль и др.; под ред. Ю.А. Израэля. Л.: Гидрометеоиздат, 1990. 295 с.
6. Распространение ионизирующих излучений в воздухе / В.А. Климанов и др.; под ред. В.И. Кухтевича и В.П. Машковича. М.: Атомиздат, 1979. 216 с.
7. Кольчужкин А.М., Учайкин В.В. Введение в теорию прохождения частиц через вещество. – М.: Атомиздат, 1978. – 256 с.
8. Свидетельство № 2010610416 о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программа для имитационного моделирования систем детектирования гамма-излучения DINAM / Новиков И.Э. (РФ); заявлено 02.11.2009; зарегистр. в реестре программ для ЭВМ 11.01.2010.
9. E.Storm, H.I.Israel. Photon cross ections from 1 kev to 100 Mev for elements Z = 1 to Z = 100. Nuclear Data Tables A7, 1970, p. 565–681.
10. Израэль, Ю. А. Гамма-излучение радиоактивных выпадений / Ю. А. Израэль, Е. Д. Стукин .— Москва : Атомиздат, 1967 .— 224 с
11. И.Э. Новиков Пакет программ для моделирования процессов переноса и регистрации гамма-излучения для авиационного радиационного мониторинга с помощью беспилотных летательных аппаратов. // Сборник докладов Международной научно-технической конференции «ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ РОБОТОТЕХНИКА» 23-25 ноября 2011, Санкт-Петербург.
12. И.Э. Новиков Коган Л.Б. Многоканальный спектрометрический метод дистанционного измерения мощности дозы. //Сборник трудов Международной научно-технической конференции «ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ РОБОТОТЕХНИКА-2012 » 25-26 апреля 2012.
13. Власенко А. Н., Лапин О.Е., Новиков И.Э. «Решение прямой и обратной задачи сцинтилляционной гамма-спектрометрии для дистанционного измерения характеристик поля излучения источника, образованного техногенными радионуклидам» Труды 7-го международного симпозиума «Экстремальная робототехника – робототехника для работы в условиях опасной окружающей среды» (2-3 октября 2013 года, Санкт-Петербург). С. 523-530.

V.A. Pavlov

STANDARDIZATION AFFAIRS IN THE FIELD OF ROBOTICS

CRDI RTC, Saint-Petersburg
vapavlov@rtc.ru

Abstract

The paper presents an overview of the state of works on standardization in the field of robotics in Russia as well as abroad. Organizational affairs of the development of standards on robotics in Russia are considered. An approach to the creation of the new series of national standards “Robots and robotic devices” is presented. A designation of the standards of this series is considered. The first standards of the new series being under development are presented.

Keywords: robotics, robots, standardization, standards, series of standards, standard designation.

В.А. Павлов

ВОПРОСЫ СТАНДАРТИЗАЦИИ В ОБЛАСТИ РОБОТОТЕХНИКИ

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

Аннотация

В докладе дан обзор состояния работ по стандартизации в области робототехники в России и за рубежом. Рассмотрены организационные вопросы разработки стандартов по робототехнике в России. Представлен подход к построению нового комплекса национальных стандартов «Роботы и робототехнические устройства». Рассмотрено обозначение стандартов данного комплекса. Представлены первые разрабатываемые стандарты нового комплекса.

Ключевые слова: робототехника, роботы, стандартизация, стандарты, комплекс стандартов, обозначение стандартов.

Введение

Робототехника, как наука и техническое направление, начала интенсивно развиваться с 60-х годов прошлого столетия. Сначала это были экспериментальные лабораторные образцы, потом появились промышленные роботы. В настоящее время, наверно, сложно найти область человеческой деятельности, в которой не применяются или не планируют применяться роботы и робототехнические устройства. Роботы применяются в промышленности, в медицине, в военном деле, при ликвидации последствий техногенных аварий и природных катастроф, в космосе, в быту и т.д. Внешняя среда, в которой функционируют роботы, также разнообразна – это жилые и производственные помещения, открытая пересеченная местность, надводная и подводная среда и т.д. Широкое применение роботов в различных сферах деятельности человека диктует необходимость разработки соответствующих стандартов, чтобы как-то упорядочить процесс роботизации и обеспечить возможность сертификации выводимых на рынок роботов и робототехнических устройств.

1 Стандартизации в области робототехники за рубежом

Зарубежные стандарты подразделяются на международные стандарты, региональные стандарты, стандарты некоммерческих и профессиональных объединений и организаций и национальные стандарты промышленно развитых стран. Стандарты по робототехнике, относящиеся к категории международных стандартов, разрабатываются в двух организациях – в Международной организации по стандартизации (ИСО) и в Международной электротехнической комиссии (МЭК). Россия является полноправным членом в обеих организациях и через своих экспертов участвует в разработке стандартов и имеет право голоса.

В ИСО до недавнего времени стандарты по роботам разрабатывались в подкомитете SC 2 Robotsandroboticdevices технического комитета TC 184 Automationsystemsandintegration. Однако в 2015 году руководством ИСО было принято решение об образовании самостоятельного технического комитета для ведения работ по стандартизации в сфере робототехники. С 1 января 2016 года в ИСО функционирует технический комитет TC 299 Robotics (Робототехника). В настоящее время в работе TC 299 принимают участие эксперты из 24 стран, включая Россию.

В область ответственности ТС 299 включены 13 действующих международных стандартов по робототехнике и 9 проектов международных стандартов, находящихся на разных стадиях разработки. Следует отметить, что первоначально все стандарты ИСО относились к промышленным роботам и издавались с общим заголовком “Manipulatingindustrialrobots”. Однако в последние годы, в связи с появлением и все большим внедрением сервисных роботов, стандарты стали пересматриваться с целью их распространения и на сервисные роботы и издаваться уже под общим заголовком “Robotsandroboticdevices”.

Основополагающим можно назвать стандарт ИСО 8373:2012 по терминам и определениям [1], который призван обеспечить однозначное понимание и использование терминов по робототехнике. В этом стандарте определены термины (всего их 171), относящиеся к общей терминологии по роботам, механической конструкции, геометрии и кинематике, программированию и управлению, техническим характеристикам, очувствлению и навигации. В разработке сейчас находится стандарт по терминам и определениям для мобильных роботов [2], дополняющий стандарт [1]. Два стандарта, устанавливающие требования к медицинским роботам для хирургии и реабилитации, разрабатываются совместно с МЭК.

В отличие от ИСО, в МЭК разработка стандартов в сфере робототехники рассредоточена по разным техническим комитетам. В частности, работы по роботам, применяемым в медицине, ведутся в ТС 62, по роботам для уборки помещений – в ТС 59, по роботам-газонокосилкам – в ТС 116.

В настоящее время действующими являются два стандарта МЭК, которые устанавливают требования к роботам, используемым в быту – роботам-пылесосам и роботам-газонокосилкам с аккумуляторным питанием.

В разработке находятся 6 стандартов, непосредственно относящихся к роботам, включая новый проект по разработке стандарта, определяющего основные требования к дистанционно-управляемым беспилотным автоматическим устройствам для ядерных и радиоизотопных применений. Следует отметить, что существует большое число стандартов МЭК, которые относятся к роботам опосредовано, т.е. как к устройствам, представляющим определенный тип электротехнического оборудования. В настоящее время в МЭК создан Консультативный комитет по применению технологий робототехники (ACART), а в ТС 59 создана рабочая группа WG16 для разработки стандарта по методам оценки характеристик интеллектуальных мобильных робототехнических платформ, применяемых в домашнем хозяйстве и других сходных областях. Кроме того, в SC 62D созданы две совместные рабочие группы с ИСО ТС299 по медицинским роботам для хирургии и реабилитации.

В Европейском комитете по стандартизации (CEN) разрабатываются стандарты, относящиеся к категории региональных стандартов. В области робототехники в CENприняты три стандарта ИСО и разработаны 8 стандартов, устанавливающих требования по безопасности при работе с окрасочными, сварочными и штабелирующими промышленными манипуляционными роботами.

Свои стандарты в области робототехники разрабатывают и в целом ряде некоммерческих и профессиональных международных организаций, многие из которых базируются в США.

В рамках Института инженеров по электротехнике и электронике (IEEE) действует Общество по робототехнике и автоматизации (RAS), в котором сформированы две рабочие группы – ORA(OntologiesforRoboticsandAutomation), разрабатывающая стандартные онтологии по робототехнике, и MDR (RobotMapDataRepresentation), разрабатывающая представления цифровых карт для навигации мобильных роботов. Каждая из этих групп выпустила в 2015 году по одному стандарту IEEE.

В Специальной группе по робототехнике (RoboticsDTF) Некоммерческого консорциума OMG (ObjectManagementGroup) разрабатываются стандартные спецификации представления данных для робототехнических систем. К настоящему времени разработаны три спецификации – компонентной модели робота, сервиса определения местоположения робота и сервиса обеспечения взаимодействий робота. В разработке находится спецификация уровня абстракции от аппаратного обеспечения робота.

В Международном обществе инженеров автомобильной промышленности (SAE International) ведутся работы по проекту «Общая архитектура беспилотных систем» (JAUS), в рамках которого разрабатываются стандарты, относящиеся как к наземным, так и к воздушным беспилотным системам.

Стандарты по испытаниям роботов разрабатываются в Американском обществе по испытаниям и материалам (ASTM International). В Национальном институте стандартов и технологий (NIST), относящемся к Министерству торговли США, выпущено два стандарта по базовой структуре уровней автономности беспилотных систем (проект ALFUS). Американское общество сварщиков (AWS) выпустило 8 стандартов по сварочным роботам. Стандарты по безопасности роботов и робототехнических устройств

разработаны в Ассоциации робототехнических отраслей промышленности (RIA) и в Лаборатории страховщиков (UL).

Более подробный анализ состояния работ по стандартизации в области робототехники за рубежом представлен в работе [3].

2. Стандартизация в области робототехники в России

В Советском Союзе в 80-х годах прошлого века в соответствии с государственными программами по развитию промышленной робототехники была разработана соответствующая программа по стандартизации и выпущены первые стандарты в этой области. Всего было разработано 29 стандартов и 8 рекомендаций по промышленным роботам и манипуляторам, в разработке многих из которых принимали участие специалисты ЦНИИ РТК.

В этих стандартах были определены основные термины и понятия в области манипуляторов, автооператоров и промышленных роботов, общие технические требования для промышленных роботов, предназначенных для разных отраслей промышленности, правила приемки и методы испытаний, требования к составным частям и системам управления. Группа из 8 стандартов была посвящена агрегатно-модульной архитектуре промышленных роботов.

В 90-е годы было разработано и принято в качестве межгосударственных стандартов всего 5 стандартов по роботам, из которых 3 были разработаны на Украине. Два российских стандарта были разработаны на основе стандартов ИСО, а украинские стандарты были посвящены сварочным роботам и требованиям по безопасности (также на основе стандарта ИСО).

Затем после более чем 10-летнего перерыва были разработаны и введены в действие 3 национальных стандарта,разработанные ФГУ ВНИИПО МЧС России и входящие в комплекс стандартов «Техника пожарная», которые установили требования к робототехническим комплексам для проведения аварийно-спасательных работ и пожаротушения.

Таким образом, кроме трех стандартов, посвященных технике пожаротушения, все остальные действующие в России стандарты относятся к промышленным роботам, разработаны достаточно давно и требуют пересмотра. Кроме того, в настоящее время наибольшее развитие получают медицинские, бытовые, космические и специальные, роботы. Именно этим направлениям следует уделять особое внимание и в сфере стандартизации.

В целях реализации Федерального закона от 27 декабря 2002 г. №184-ФЗ «О техническом регулировании, гармонизации со структурой ИСО ТК 184 и повышения эффективности работ по стандартизации в сфере разработки, создания и эксплуатации роботов и робототехнических устройств, приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 27 февраля 2014 г. №210 в структуре ТК 459 «Информационная поддержка жизненного цикла изделий» создан подкомитет (ПК 7) «Роботы и робототехнические устройства». Этим же приказом ведение секретариата ПК 7 поручено ЦНИИ РТК и на ПК7 возложены функции постоянно действующего национального рабочего органа ИСО/ТК 184/ПК 2 (ИСО/ТК 299 с 1 января 2016 г.) «Robotsandroboticdevices».

В настоящее время по аналогии с ИСО формируется новый технический комитет по стандартизации «Робототехника». Соответствующее уведомление опубликовано на сайте Росстандарта 29 апреля 2016 года.

В текущем году в соответствии с Программой разработки национальных стандартов должны быть приняты 11 национальных стандартов по робототехнике, входящих в новый комплекс национальных стандартов под общим названием «Роботы и робототехнические устройства». Целью стандартов комплекса «Роботы и робототехнические устройства» является повышение интероперабельности роботов и их компонентов, а также снижение затрат на их разработку, производство и обслуживание за счет стандартизации и унификации процессов, интерфейсов и параметров.

Стандарты комплекса «Роботы и робототехнические устройства» представляют собой совокупность отдельно издаваемых стандартов. Стандарты данного комплекса относятся к одной из следующих тематических групп: «Общие положения, основные понятия, термины и определения», «Технические и эксплуатационные характеристики», «Безопасность», «Виды и методы испытаний», «Механические интерфейсы», «Электрические интерфейсы», «Коммуникационные интерфейсы», «Методы программирования», «Методы построения траектории движения (навигация)», «Конструктивные элементы». Стандарты любой тематической группы могут относиться как ко всем роботам и робототехническим устройствам, так и к отдельным группам объектов стандартизации – промышленным роботам в целом, промышленным манипуляционным роботам, промышленным транспортным роботам, сервисным роботам в целом, сервисным манипуляционным роботам и сервисным мобильным роботам.

Стандарты комплекса должны обеспечивать возможность:

- унификации роботов и их компонентов для обеспечения применения ранее разработанных изделий в новых разработках;
- снижения трудоемкости и повышения эффективности разработки, изготовления, эксплуатации и ремонта роботов;
- автоматизации проектирования новых изделий;
- проведения сертификации роботов на соответствие требованиям.

Стандарты комплекса, по-возможности, должны быть гармонизированы с международными стандартами ИСО, разрабатываемыми в ИСО/ТК 299, и МЭК.

В проекте стандарта ГОСТ Р 60.0.0.1 «Роботы и робототехнические устройства. Общие положения» определены основные принципы построения и структура комплекса, а также обозначения входящих в него стандартов. Термины с их определениями, использованные в этом стандарте, взяты из соответствующего стандарта ИСО [1]. Определена схема обозначений стандартов комплекса, которая имеет следующий вид:

ГОСТ Р 60.Р.К.Н–ГГГГ,

где 60 – номер, присвоенный комплексу стандартов «Роботы и робототехнические устройства»,
Р – шифр объекта стандартизации,
К – шифр категории стандарта,
Н – порядковый номер стандарта в данной группе,
ГГГГ – год утверждения стандарта.

Приняты следующие цифровые шифры объектов стандартизации:
0 – стандарты, относящиеся к любым роботам;
1 – стандарты, относящиеся к любым промышленным роботам;
2 – стандарты, относящиеся к любым сервисным роботам;
3 – стандарты, относящиеся к промышленным манипуляционным роботам;
4 – стандарты, относящиеся к промышленным транспортным роботам;
5 – стандарты, относящиеся к сервисным манипуляционным роботам;
6 – стандарты, относящиеся к сервисным мобильным роботам.

Категориям стандартов присвоены следующие цифровые шифры:
0 – общие положения, основные понятия, термины и определения;
1 – технические и эксплуатационные характеристики;
2 – безопасность;
3 – виды и методы испытаний;
4 – механические интерфейсы;
5 – электрические интерфейсы;
6 – коммуникационные интерфейсы;
7 – методы программирования;
8 – методы построения траектории движения (навигация);
9 – конструктивные элементы.

Данные перечни объектов стандартизации и категорий стандартов являются открытыми. В случае потребности в разработке стандарта, который не относится к одной из перечисленных выше категорий, в данный перечень будет введена новая категория с новым цифровым шифром. То же самое можно сказать и о перечне объектов стандартизации.

Наименование стандартов комплекса в общем случае в соответствии с ГОСТ Р 1.5–2012 и ГОСТ 1.5–2001 включает:

- групповой заголовок «Роботы и робототехнические устройства»;
- заголовок, соответствующий объекту стандартизации;
- подзаголовок 1, соответствующий категории стандарта;
- подзаголовок 2, определяющий содержание стандарта.

При этом подзаголовок 2, определяющий содержание стандарта, может содержать несколько уточняющих определений, разделенных знаками препинания «точка», «запятая», «двоеточие» и/или «точка с запятой», а в наименовании стандарта может быть включено определение, конкретизирующее область применения объекта стандартизации, например, «медицинский робот», «робот для аварийно-спасательных работ» или «робот для персонального ухода».

В остальных стандартах, которые должны быть приняты в 2016 году, определены следующие положения и требования:

- общая классификация роботов и робототехнических устройств;
- виды испытаний роботов и робототехнических устройств;

- методы программирования и взаимодействия с оператором;
- общие требования по безопасности (в данном стандарте учтены основные нормативные положения стандарта ANSI/UL 1740 [4]);
- рабочие характеристики и соответствующие методы тестирования (данный стандарт идентичен [5];
- системы координат и обозначение перемещений (данный стандарт идентичен [6];
- представление характеристик промышленных манипуляционных роботов (данный стандарт идентичен [7];
- требования по безопасности к промышленным роботам (данный стандарт идентичен [8]);
- требования по безопасности к робототехническим системам и роботизированным модулям (данный стандарт идентичен [9]);
- требования по безопасности для роботов по персональному уходу (данный стандарт идентичен [10]).

В настоящее время формируется проект программы разработки национальных стандартов в области робототехники до 2020 года.

1. ISO 8373:2012 Robots and robotic devices – Vocabulary.
2. ISO/DIS 19649 Robots and robotic devices – Vocabulary for mobile robots.
3. Казанцев В.Н., Котенев В.Д., Павлов В.А. Анализ работ по стандартизации в сфере робототехники // «Перспективные системы и задачи управления»: Материалы Одиннадцатой Всероссийской научно-практической конференции, Т. 2; Южный федеральный университет – Ростов-на-Дону: Изд-во Южного федерального университета. – 2016. – С. 196-205.
4. ANSI/UL 1740-2007 Standard for Safety. Robots and Robotic Equipment.
5. ISO 9283:1998 Manipulating industrial robots – Performance criteria and related test methods.
6. ISO 9787:2013 Robots and robotic devices – Coordinate systems and motion nomenclatures.
7. ISO 9946:1999 Manipulating industrial robots – Presentation of characteristics.
8. ISO 10218-1:2011 Robots and robotic devices – Safety requirements for industrial robots – Part 1: Robots.
9. ISO 10218-2:2011 Robots and robotic devices – Safety requirements for industrial robots – Part 2: Robot systems and integration.
10. ISO 13482:2014 Robots and robotic devices – Safety requirements for personal care robots.

A.S. Yushchenko, K.V. Ermishin

COLLABORATIVE MOBILE ROBOTS - A NEW STAGE OF ROBOTICS.

Bauman Moscow State Technical University, Moscow
robot@bmstu.ru

1. Introduction. Terminology and area of application

There is a new trend of modern robotics - it is an interest in robots working in close contact with human (collaborative robots or co-robots) not only in domestics and service applications but also in an industrial field. Originally, the term "collaborative robot" (CR) has been applied to the robotic arm or industrial manipulators which performs manufacturing tasks together withhuman without danger to him. Nowadays there are many types of automatic conveyor assembly line, where co-robots help human to perform a difficult task working almost next to him. In analytic reviews mentioned a new term "mixed labor" as cooperation of humans and robots. Recently the new term "soft robots' was applied, which refers to both the design of the robot (safety for humans), and the adaptive control system. The main task now changed radically - the robots have to operate in conditions of uncertainty of the changing external world (including humans) and need to independently adapt to this uncertainty, respond to emerging obstacles. In this case, the concept of control system is changing too. The control system of co-robot should react to emerging obstacles and uncertainties, correct operator's errors and contact with other robots and people. The robot programming is changing by training. An example of an industrial robot, designed to work together with people is the robot Baxter (the company «Rethink Robotics»), which could be trained by showing the required actions by operator, and its mechanical parts are harmless for humans even in a collision.

The term "collaborative robot" can be used with no less reason for mobile robots included in cooperative work with human – "collaborative mobile robots" (CMR). For example, a guide-robot working in the airport, in a museum or a robot accompanying a person with visual impairments. Also it may be a robot, providing a human telepresence, for example, remote consultation by a doctor. Autonomous robots may work in a restaurant, etc. Such robots must follow the task set by the user and autonomously move in the working space

avoiding collisions with people and other robots. The control system of the robot should comprehensively estimate the environmental situation and respond to its changes. In the situation when the connection between human and robot is lost, robot should return back using stored information about environment. Also co-robot should have a dialogue system for providing a possibility of interaction with user in a language close to natural one. Thus, from traditional control tasks we come to the new problem of interaction between man and the technical system with artificial intelligence.

The main trend, which follows from the analysis of the global robotics market, is the significant increase in the share of service robotics, including both professional collaborative robots and robots for personal use. The volume of sales of service robots in the world grew about twice from 2010 to 2015 [1]. If the robotics market in previous years included mainly the robots for welding and for transport operations (90% in the automotive industry), now robotics are rapidly expanding now into new robotics field - agriculture, food industry, construction and medicine. Service sector does not remain aloof - robotic devices become increasingly introduced in shops, catering, sphere of leisure

Collaborative Robotics is of particular interest for extreme applications, including the work dangerous for health and life of human. Remote-controlled robotic systems are generally used in this area now. These systems may be considered as an initial stage of collaborative robotics. It is particularly important to simplify the management task for humans and improve autonomy and reliability of such robotic systems. We need to move from current motion control of platforms and manipulators to the dialogue between human and robot both at the stage of learning and at the stage of practical applications. The area of CMR applications is very broad. It include the search and neutralization of hazardous objects, radiological and chemical reconnaissance tasks, work in the area oftechnogenous and natural disasters, rescue operations.

2. Structure of the control CMR system

The functional scheme of the CMR control system is presented on Fig. 1.

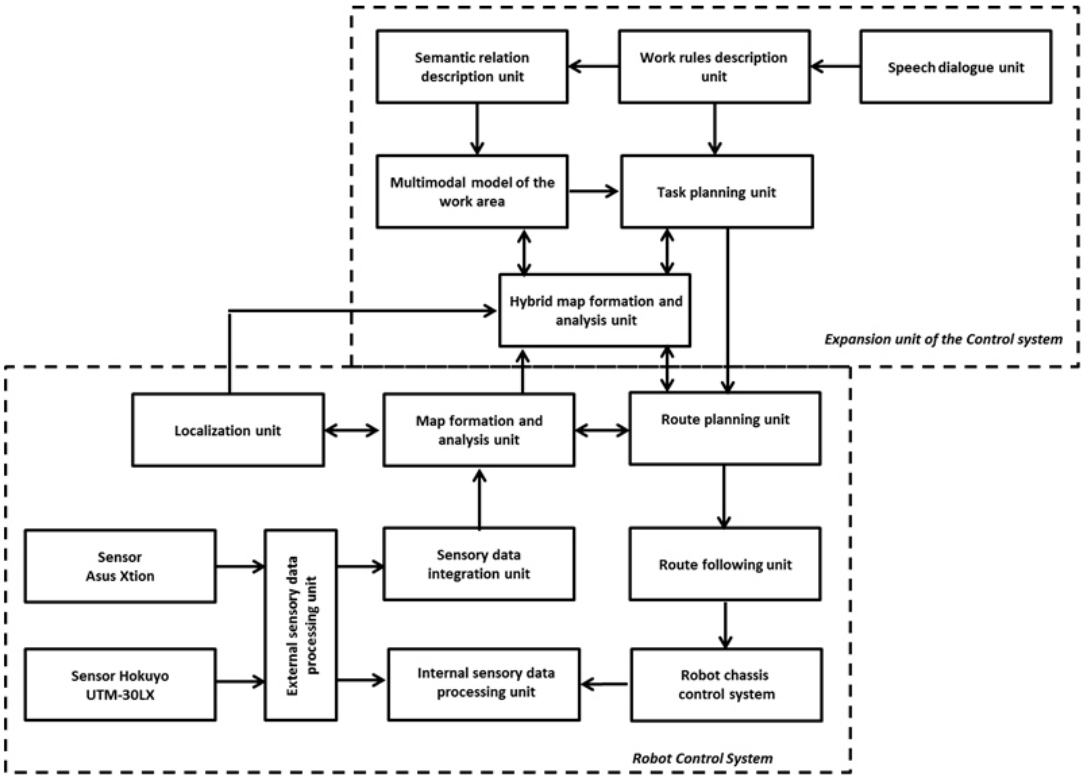


Figure 1 – The functional scheme of collaborative mobile robot

CMR control system has a two-level architecture consisting of a base part and expansion part. The base part of control system is responsible for the movement control of a mobile robot. It collects and analyzes sensory information, composes a map of working zone, determines the localization of robot and the surrounding objects. The functions of the base part are also the route planning and robot movement control. To some extent, this is a common scheme of autonomous mobile robot control system [2].

The expansion part of the control system provides interaction of the robot with a human operator through dialogue in natural language by means of which the sequence of the working tasks for robot is formed by human. The dialogue applies a topographical description of the working scene with an indication of any

objects on the scene and actions required. For example, the task "Move to the utility room" relates the geometric coordinates of the target point with a topographical map of the whole floor plan. On the other hand, the task "Stop for loading the cargo" associates the topographical floor plan with lots of potential parking spaces, as well as relates the current position of the robot and a comprehensive evaluation of the working area, taking into account the position of the surrounding objects, movement of people and the safety of movement of the robot.

The expansion part of the control system provides the route planning of robot based on an analysis of the multi-layer map of the working area. The control system provides additional feedbacks, including visual feedback, tactile sensors, sensors of forces and torques, as well as speech feedback, realized in the form of verbal dialogue, and also it may provide a mimic feedback, facilitating the dialogue of machine and man [3].

To avoid collisions with moving obstacles, it is necessary to know their position and to predict the trajectory of their movement. Then robot can move along the planned trajectory, deviating from it at right time to make the necessary maneuver to avoid the object. One of the developed methods of the control of robot in a dynamic environment is based on the tracing of moving obstacles [4]. On the first step of the procedure the task of route planning is solving using the map of lodging or terrain map built by a grid functions method. It uses the well-known A* algorithm. Further, we need to solve the problem of tracing of moving obstacles, i.e. determining the vector of current positions of obstacles synchronized at each time to obtain a new scan. Classification and clustering of scan points are performed first to build a list of obstacles.

Safe movement of the mobile service robot and effective interaction with man are possible through the use of multimodal representation of the surrounding space in the form of a multi-layer map of working area of the robot. The basis map is a topographic terrain plan or a geometric floor plan marked up into zones, which include movement restriction zones and zones associated with the performance of work operations [5]. Integration of information from different local maps obtained on the basis of indications of airborne sensor systems, allows us to refine the surroundings. For example, local map obtained by laser scanning rangefinder is used to localize the robot on the topographic plan and a map obtained using array of sonars, located on the perimeter of the robot, allows to evaluate the presence of objects around the robot during its motion [6]. Assessment of changes in the status of the working area allows to create a sequence of safe robot maneuvers to prevent collisions with fixed and moving obstacles in a rapidly changing cramped conditions.

Merging of technical modules, voice input-output, network and ontological representations into a single multimodal semantic network allows realize an intelligent dialogue of user with the robot. Multimodal model of the robot world includes: (1) semantic network [2], the lower-level nodes which are the objects of the working environment in which the robot operates. These nodes are associated with the top-level nodes corresponding work areas or private premises. The model also includes (2) video sequences of objects (pictures or special graphical mark, marking the object), and (3) the speech images of designations of these objects. The semantic network describing the model of the external robot world, is projected onto the floor plan or site plan, which include the coordinates of the objects depicted on it. This representation is convenient for its imaging and memorizing by human operator.

Collaborative robot interacts constantly with operator, who puts the current task in accordance with the received information. When the interaction is disrupted due to external or internal causes, like a loss of communication, poor visibility and in other cases, there is a problem of automatic robot return to operator. The main way to solve this problem is a SLAM method using laser ranging [7]. It manages to achieve refinements and substantial increase of the reliability of the navigation system with help of visual odometry, i.e. evaluation method of linear and angular displacement of the robot by analyzing a sequence of images taken with the camera mounted on it [8]. Studies have shown that the integration of this method with other methods of determining the current position of the robot, including GPS and laser ranging manages to solve the problem of the return of the robot when connection is lost, even if there have been significant changes in the situation [9].

3. The dialog control of collaborative robot

Collaborative mobile robots control by operator acquires the character of tasks setting and dialogue accompanying their fulfillment. The “natural” for human perception space and time relations are necessary to use in this case to simplify the task of the robot control for human. Extential and intentional fuzzy relations are used to describe the spatial relationships between the objects of the working scene. [10]. The former include the relationship of the position and orientation of objects. For example, "a1-object is far away and right in front of the a2-object". Intentional relationships include relationships such as touch; be inside; be out; be in the center, etc. A different relationship occurring in practice can be built from elementary spatial binary relations using formal rules conjunction and disjunction.

Complementing the semantic map of the working scene by fuzzy relationship, we provide the voice dialogue of the robot with human, using natural to human representations of space and time. In general the situation is determined by the frame, which slots are the names of the objects of external world, natural relationships between objects, both spatial and temporal, as well as other features that characterize the situation. Comparison of the observed situation with a reference situation contained in the knowledge base is carried out using various criteria of fuzzy proximity of situations, so the resulting evaluation of situation by robot is not other that a formalized and averaged human evaluation of a similar situation.

The set of names of specified objects in the working area and fuzzy relations between them make up a vocabulary of a formal language for situation describing. A dialogue between robot and human can be organized on the situational language in the situation analysis. Dialogue mode of interface allows robot to generate requests to operator in the absence of the necessary information to build a model of the external world.

After describing the current situation in terms of linguistic variables and fuzzy relationships it is possible to specify the behavior of an autonomous robot in an external, partially determined environment using production fuzzy rules. You can priory select patterns of behavior defined by current situation. They are sometimes considered as an analogue of reflex behavior "stimulus-response". These patterns of behavior are of the form of production rules: "if the situation is Si, the tactics is Ti». Under tactics we mean the set of rules of behavior expressed by linguistic variables and determined by the stated purpose. It is expected that the typical situations may be included into fuzzy knowledge base of robot in advance using human operator experience. These rules can be introduced in form of voice instructions to the robot, which can be supplemented and modified in the process interaction of robot and human when performing a specific task. Availability of tactics derived by robot in advance, or in learning, greatly simplifies the task of the operator, eliminating it from the robot control in dealing with routine tasks.

Implementation of robot behavior in uncertain environment is implemented by a hybrid neuro-fuzzy network, which is the basis of a fuzzy controller [11]. Such network allows to provide the collaborative robot learning. The peculiarity of training –process is an opportunity to supplement the priori information by training the robot on examples. It is possible to configure a hybrid fuzzy network by supervision of work of human by setting the basic behavior rules from human work experience in form of production rules.

Realization of a dialogue control system involves the creation of a speech interface that includes a recognition module and linguistic analyzer. The first module is a device for converting voice signals and interpreting of them as separate words or phrases. Linguistic analyzer performs syntax and semantic analysis of the statements, as a result of which the frame slots are filled to describe the action [12].

As an example the implementation of control system of collaborative mobile robot OBYS is considered. The robot is mounted on a differential type of chassis and equipped with scanning laser rangefinder Hokuyo UTM-30LX, the control system based on single board computer ODROID-XU4 and software and hardware ST-Robotics complex for autonomous navigation inside buildings. The robot is controlled by voice commands of natural language. The robot can detect the external obstacles and plans the route of its movement, taking into account the continuously changing external environment.

Conclusion

The multimodal information system and the dialogue control method application can greatly simplify the task of robot control, as in this case practically does not required any special skills from the operator. Therefore, we can expect a dialogue control method to get widely distributed in collaborative robots control, including service robots and special-purpose robots. We should include the task of "mixed" multiagent control, i.e. teams management tasks, including both men and groups of robots among the new challenges that require the attention of CMR researchers. The psychological problems of interaction between man and robot are also of great importance in study of problems of control of collaborative robots [13].

1. The Robot Report: [электронный ресурс]. — URL: http://www.therobotreport.com
2. Vorotnikov S.A., Ermishin K.V. Intelligent Control System of a Service Mobile Robot. Transaction of the Conference Extreme Robotics S-Pb. “Politechnika service”. 2012, pp.285–289
3. Konyshev D.V., Yuschenko A.S. Control of mimic apparatus of antropomorphic robots. Robototechnika i Technicheskaya Kibernetika. 2015. № 3, pp. 64-70
4. Gerasimov V.N To the problem of a mobile robot control in the dynamic environment. Robototechnika i Technicheskaya Kibernetika. 2014. № 1(2), pp. 44–51
5. Vorotnikov S.A., Ermishin K.V. Control system of a service guide robot. Transaction of the Conference Extreme Robotics S-Pb. “Politechnika service”. 2011, pp.351–356

6. Vorotnikov S.A., Ermishin K.V. Multiagent sensor system of a service mobile robot. Vestnik BMSTU Priborostroenie. M.:2012, Special issue № 6 «Robotic Systems» pp. 50-59
7. Gerasimov V.N.. SLAM algorithm on the base of a covariation function..
8. Nist´er D., Naroditsky O., Bergen J., «Visual odometry for ground vehicle applications». Journal of Field Robotics, Volume 23(1). 2006. pp. 3-20
9. Deveterikov E.A, Mikhailov B.B. Application of visual odometer datum for mobile robot autonomous return in the unknown environment. Transaction of the Conference Extreme Robotics S-Pb. “Politechnika service”. 2015, pp.356–361.
10. Kandrashina E.Yu., Litvinceva L.V., Pospelov D.A. Time and Space Presentation in Intelligent Systems. Nauka. M. 1989
11. Yuschenko A.S. Dialogue Mode of Robot Control on the Base of Fuzzy Logic. Transaction of the Conference Extreme Robotics S-Pb. “Politechnika service”. 2015, pp. 143-146.
12. Zhonin A.A. Training Algorithm for dialogue manager of a speech dialogue system. Integrated Models and Soft Calculations in Artificial Intelligence. Proceedings of International Conference. Fiz-Mat. Lit., 2011, p.p. 395-406.
13. Yuschenko A.S. The state of art in dialogue robots control.– «Actual Problems of labour psychology, engineering psychology and ergonomics» – Proc. of Institute of psychology RAN, vol. 7. 2015,p.p. 408-423.

А.С.Ющенко, К.В.Ермишин

КОЛЛАБОРАТИВНЫЕ МОБИЛЬНЫЕ РОБОТЫ – НОВЫЙ ЭТАП РАЗВИТИЯ РОБОТОТЕХНИКИ

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва
robot@bmstu.ru

1.Введение.

2.Терминология и область применения.

Новая тенденция современной робототехники – это интерес к роботам, работающим в контакте с человеком (*collaborative robots*, или сокращенно *co-b*ots, т.е. *коллаборативные роботы*) не только в сфере сервисной робототехники, но и в промышленном производстве. Первоначально термин *«коллаборативный робот»* (КР) применялся к манипуляторам, которые могли выполнять производственные задачи совместно в человеком, не представляя для него опасности. Появились линии конвейерной сборки, на которых роботы помогают работе человека, практически работают рядом с ним. В аналитических обзорах упоминается новый термин «смешанная рабочая сила», которую составляют взаимодействующие люди и роботы. В последнее время появился термин *Soft robotics* (*Мягкие роботы*), который относится как к конструкции робота (безопасность для человека), так и к системе управления. Основная задача теперь радикально изменилась – роботы должны работать в условиях неопределенности изменяющегося внешнего мира (включая человека) и самостоятельно адаптироваться к этой неопределенности, реагировать на возникающие препятствия. Меняется концепция и системы управления. Она должна самостоятельно реагировать на возникающие препятствия и неопределенности, исправлять ошибки оператора, контактировать с другими роботами и с людьми. Программирование робота в этих условиях заменяется его обучением. Примером промышленного робота, предназначенного для работы совместно с людьми, является робот Baxter (компания «Rethink Robots»). Он обучается путем демонстрации оператором нужных действий, а его конструкция не причинит вред человеку даже при столкновении**.**

Термин *«коллаборативный робот»* может быть применен с не меньшим основанием и для мобильных роботов, включенных в человеческую деятельность - *коллаборативных мобильных роботов* (КМР). Это может быть робот – гид в аэропорту, или в музее, робот-поводырь, сопровождающий человека с дефектами зрения, робот, обеспечивающий телеприсутствие человека, например, врача при дистанционных медицинских консультациях, робот, обслуживающий посетителей в ресторане и т.д. Такой робот должен, следуя задаче, поставленной пользователем, самостоятельно перемещаться в пространстве, в котором могут находиться и другие движущиеся объекты, в том числе, люди, другие роботы, избегая столкновения с ними. Система должна комплексно оценивать окружающую обстановку и самостоятельно реагировать на её изменение. При потере связи с человеком робот должен самостоятельно вернуться к своему «хозяину», используя полученную и запомненную информацию о внешнем мире. Предполагается возможность диалога робота с человеком, в том числе, с использованием языка, близкого к естественному. Таким образом, от традиционной задачи управления,

мы переходим к новой задаче взаимодействия человека и технической системы, обладающей искусственным интеллектом.

Основная тенденция, которая следует из анализа мирового рынка робототехники, это существенное повышение доли сервисной робототехники, включая как профессиональные коллаборативные роботы, так и роботы для персонального применения. Объем продаж сервисной робототехники в мире с 2010 до 2015 г. вырос примерно в два раза [1]. Если раньше основу рынка робототехники составляли роботы для сварки, транспортных операций, преимущественно в автомобильной промышленности (90%), то теперь робототехника быстро осваивает новые области – сельское хозяйство, пищевую промышленность, строительство, медицину. Не остается в стороне и сфера обслуживания – робототехнические устройства начинают все активнее внедряться в магазины, предприятия питания, в сферу досуга.

Коллаборативная робототехника представляет особый интерес для экстремальных приложений, в том числе, при решении задач, представляющих угрозу здоровью и жизни человека. Сейчас здесь, как правило, используются дистанционно управляемые робототехнические системы, которые можно рассматривать как начальную стадию развития коллаборативной робототехники. В этой сфере особенно важно максимально упростить задачу управления для человека и повысить автономность и надежность системы управления роботом. На современной стадии развития робототехники нужно переходить от управления движениями платформы, манипуляторов, к диалогу с роботом как на этапе обучения, так и на этапе практического применения. Область применения КМР здесь очень широка. Это поиск и обезвреживание опасных объектов, задачи радиационной и химической разведки, работа в зоне техногенных и природных катастроф, спасательные операции.

2.Структура системы управления КМР.

Функциональная схема системы управления мобильного коллаборативного робота приведена на рис.1.

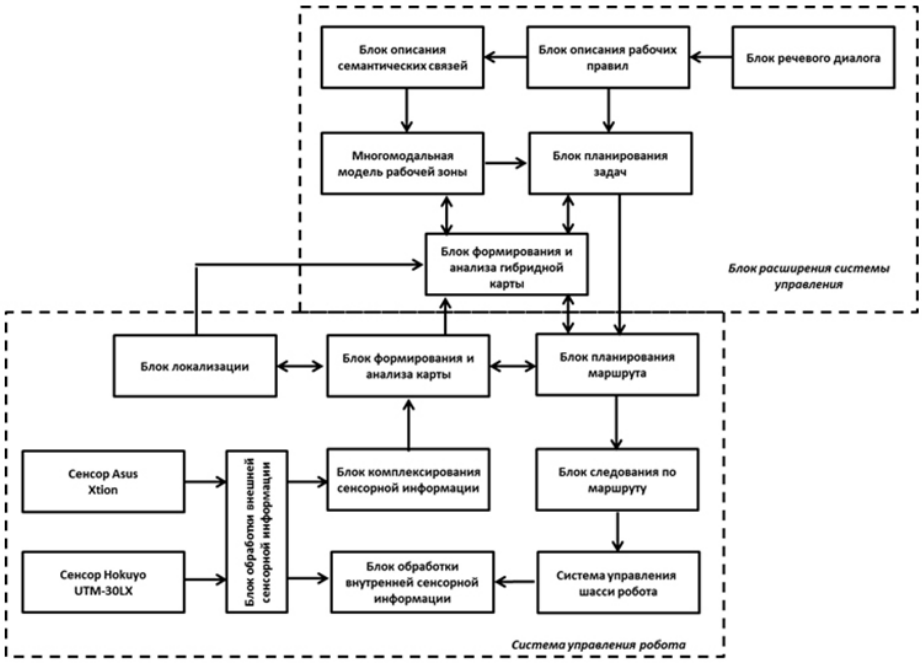


Рисунок 1 – Функциональная схема мобильного коллаборативного робота

Система управления МКР имеет двухуровневую архитектуру, состоящую из базового блока и блока расширения. Базовый блок системы управления отвечает за управление движением мобильного робота – осуществляет сбор и анализ сенсорной информации, формирование карты рабочей зоны, локализацию робота и окружающих объектов, а также планирование маршрута и управление движением робота. В определенной мере это обычная схема системы управления автономным мобильным роботом [2].

Блок расширения системы управления обеспечивает взаимодействие робота с человеком-оператором путем диалога на естественном языке, с помощью которого человеком формируется последовательность рабочих задач робота. При этом используется топографическое описание рабочей сцены с указанием на рабочей сцене каких-либо объектов и требуемых действий над ними. Например, задача – «двигаться в техническое помещение» связывает геометрические координаты целевой точки с топографической картой плана помещения в целом. С другой стороны, задача – «остановиться для

загрузки груза» связывает топографический план помещения с множеством возможных парковочных мест, а так же текущее положение робота и комплексную оценку рабочей зоны, учитывающей положение окружающих объектов, перемещение людей и безопасность движения робота.

Блок расширения системы управления обеспечивает планирование маршрута движения робота на основании анализа данных гибридной карты рабочей зоны. Система управления содержит дополнительные обратные связи, включающие зрительную обратную связь тактильные датчики, датчики сил и моментов, а также речевую обратную связь, реализуемую в форме речевого диалога, а также, возможно, мимическую обратную связь, облегчающую диалог машины и человека [3].

Чтобы избежать столкновений с движущимися препятствиями, необходимо знать их положение и предсказывать траекторию их движения. Тогда можно двигаться вдоль спланированной траектории, отклоняясь от нее в нужный момент, чтобы совершить маневр и объехать препятствие. Один из разработанных способов управления роботом в динамической среде, основан на трассировке подвижных препятствий [4]. На первом этапе решается задача планирования маршрута по построенной методом сеточных функций карте помещения, или карте местности. Для этого используется хорошо известный алгоритм A*. Далее решается задача трассировки подвижных препятствий – определения текущего вектора состояния препятствия в каждый момент времени, синхронизированный с получением нового скана. Для построения списка препятствий, сначала проводится классификация и кластеризация точек скана.

Безопасное передвижение мобильного сервисного робота и эффективное взаимодействие с человеком возможно за счет использования многомодального представления окружающего пространства в виде многослойной карты рабочей зоны робота. Основой карты является топографический план местности, или геометрический план помещения, размеченный на зоны,включающие зоны ограничения движения и зоны, связанные с выполнением рабочих операций [5].Комплексирование информации различных локальных карт, получаемых на основании показаний бортовых сенсорных систем, позволяет уточнить окружающую обстановку. Например, локальная карта, полученная от лазерного сканирующего дальномера, используется для локализации робота на топографическом плане, а карта, полученная с помощью массива сонаров, расположенных по периметру робота, позволяет оценивать наличие объектов вокруг робота в процессе его движения [6]. Оценка изменения состояния рабочей зоны позволяет формировать последовательность безопасных маневров робота, предотвращающих столкновения с неподвижными и движущимися препятствиями в быстро изменяющихся стесненных условиях.

Объединение в единую многомодальную семантическую сеть модулей технического зрения, речевого ввода-вывода, сетевых и онтологических представлений позволяет реализовать интеллектуальный диалог пользователя с роботом. Многомодальная модель мира робота включает в себя: (1) семантическую сеть [2], вершинами нижнего уровня которой являются объекты рабочей среды, в которой функционирует робот. Эти вершины связаны с вершинами верхнего уровня, соответствующими рабочим зонам, или отдельным помещениям. Модель включает также (2) видеоряды объектов (фотографии или специальные графические метки, маркирующие объект) и (3) речевые образы обозначений этих объектов. Семантическая сеть, описывающая модель мира робота, проецируется на план помещения, или план местности, включающий координаты объектов, на нем изображенных. Такое представление оказывается удобным для его визуализации и запоминания человеком-оператором.

Коллаборативный робот постоянно взаимодействует с оператором, который ставит текущие задачи в соответствии с получаемой информацией. При потере связи, ухудшении видимости и в других случаях, когда взаимодействие нарушается в силу внешних, или внутренних причин, возникает проблема автоматического возвращения робота к оператору. Основным способом решения этой проблемы является метод SLAM с использованием лазерной дальнометрии [7]. Уточнения и существенного повышения надежности навигационной системы удаётся в этом случае добиться с помощью визуальной одометрии - метода оценки линейного и углового смещения робота с помощью анализа последовательности изображений, снятых установленной на нем камерой [8]. Проведенные исследования показали, что при комплексировании этого способа с другими способами определения текущего положения робота, включая GPS и лазерную дальнометрию удаётся решить задачу возвращения робота при потере связи даже в том случае, если произошли существенные изменения обстановки [9]

3.Диалоговое управление коллаборативным роботом

Управление коллаборативными мобильными роботами со стороны оператора приобретает характер постановки задач и диалога, сопровождающего их выполнение. При этом должны

использоваться «естественные» с точки зрения человека пространственно-временные отношения, что существенно облегчает задачу управления роботом. Для описания пространственных отношений между объектами рабочей сцены используются экстенциальные и интенциальные нечеткие отношения [10]. К первым относятся отношения положения и ориентации объектов. Например «объект a1 далеко, и впереди справа объекта a2». К интенциальным отношениям относятся такие отношения, как соприкасаться; быть внутри; быть вне; быть в центре и т.д. Из элементарных пространственных бинарных отношений можно, используя формальные правила коньюнкции и дизьюнкции, получить и другие отношения, встречающиеся на практике.

Дополнив семантическую карту рабочей сцены нечеткими отношениями, можно организовать речевой диалог робота с пользователем, используя естественные для человека представления пространства и времени. В общем случае ситуация определяется фреймом, слотами которого служат имена объектов внешнего мира, естественные отношения между объектами, как пространственные, так и временные, а также другие признаки, характеризующие ситуацию. Сравнение наблюдаемой ситуации с одной из эталонных ситуаций, содержащихся в базе знаний, проводится с использованием тех или иных критериев нечеткой близости ситуаций, так что получаемая таким образом оценка ситуации роботом представляет не что иное, как формализованную и усредненную оценку аналогичной ситуации человеком.

Совокупность обозначений (имен) заданных объектов в пространстве рабочей сцены и нечетких отношений между ними составляют словарь формального языка описания ситуации. На ситуационном языке может быть организован диалог между роботом и человеком при анализе ситуации. Диалоговая организация интерфейса позволяет роботу формировать запросы к оператору при отсутствии необходимой информации для построения модели внешнего мира.

Описав текущую ситуацию на языке лингвистических переменных и нечетких отношений, можно задать поведение автономного робота во внешней, не полностью определенной среде с помощью нечетких правил продукционного типа. Можно априори выделить стереотипы поведения, определяемые сложившейся ситуацией. Их иногда рассматривают как аналог условно-рефлекторного поведения «стимул-реакция». Эти стереотипы поведения имеют вид продукционных правил: «*если ситуация есть Si , то тактика Ti*». Под тактикой мы понимаем совокупность правил поведения, выраженных с помощью лингвистических переменных и определяемых поставленной целью. Предполагается, что типовые ситуации можно заранее заложить в нечеткую базу знаний робота, используя опыт человека-оператора. При этом сами правила можно ввести в виде речевых указаний роботу, которые могут дополняться и изменяться в процессе взаимодействия робота и человека при выполнении конкретной задачи. Наличие тактик, полученных роботом заранее, или в процессе обучения, существенно упрощает задачу оператора, избавляя его от управления роботом при решении рутинных задач.

Реализация поведения робота в заранее неопределенных условиях реализуется с помощью гибридной нейро-нечеткой сети, являющейся основой нечеткого контроллера [11]. Такая сеть позволяет обеспечить обучение коллаборативного робота. Особенность обучения – возможность дополнения априорной информации обучением робота по примерам. Задавая основные правила поведения из опыта работы человека в форме правил-продукций, можно настроить гибридную нечеткую сеть по наблюдению за работой самого человека

Организация диалоговой системы управления предполагает создание речевого интерфейса, который включает модуль распознавания и лингвистический анализатор. Первый модуль представляет собой устройство для преобразования речевых сигналов и их интерпретации в качестве отдельных слов или фраз. Лингвистический анализатор осуществляет синтаксический и семантический разбор высказывания, в результате которого заполняются слоты фрейма для описания действий [12].

В качестве примера рассматривается реализация системы управления коллаборативного мобильного робота OBYS на шасси дифференциального типа. КР оснащенсканирующим лазерным дальномером Hokuyo UTM-30LX, системой управления на базе одноплатного компьютера ODROID-XU4 и программно-аппаратным комплексом ST-Robotics для автономной навигации внутри помещений. Управление роботом осуществляется посредством речевых команд естественного языка. Робот самостоятельно обнаруживает внешние препятствия и планирует маршрут своего движения с учетом непрерывно изменяющейся внешней обстановки.

Заключение

Применение многомодальной информационной системы и диалогового способа управления существенно упрощает задачу управления роботом, поскольку в этом случае практически не требуется наличия специальных навыков у оператора. Поэтому можно ожидать, что диалоговый способ управления получит в ближайшее время широкое распространение при управлении коллаборативными роботами,

включая роботы сервисного и специального назначения.К новым задачам, которые требуют внимания исследователей КМР, следует отнести задачу «смешанного» многоагентного управления, т.е. задачи управления коллективами, включающими и людей и группы роботов. Особую роль в изучении проблем управления коллаборативными роботами должны играть проблемы психологии взаимодействия человека и робота [13].

1. The Robot Report: [электронный ресурс]. — URL: http://www.therobotreport.com
2. Воротников С.А., Ермишин К.В. Интеллектуальная система управления сервисным мобильным роботом. Экстремальная робототехника - //Труды всероссийской научно-технической конференции. Санкт-Петербург: Изд-во «Политехника-сервис», 2012, С.285-289.
3. Конышев Д.В., Ющенко А.С.. Управление мимикой антропоморфных роботов. – Робототехника и техническая кибернетика, 2015, № 3, с. 64-70
4. Герасимов В.Н. К вопросу управления движением мобильного робота в динамической среде. Робототехника и техническая кибернетика. 2014. № 1(2). С. 44–51
5. Воротников С.А., Ермишин К.В.: Система управления сервисным мобильным роботом-экскурсоводом. //Труды международной научно-технической конференции. – Санкт-Петербург: Изд-во «Политехника-сервис», 2011. С. 351 -356.
6. Воротников С.А., Ермишин К.В.: Мультиагентная сенсорная система сервисного мобильного робота. Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Приборостроение. Вып. 6. С. 50-59. (2012)
7. Герасимов В.Н. Алгоритм SLAM на основе корреляционной функции. Экстремальная робототехника: Сборник докладов всероссийской научно-технической конференции. — СПб: Изд-во «Политехника-сервис». 2015. С. 126–133
8. Nist´er D., Naroditsky O., Bergen J., «Visual odometry for ground vehicle applications». Journal of Field Robotics, Volume 23(1). 2006. pp. 3-20.
9. Девятериков Е.А., Михайлов Б.Б. Использование данных визуального одометра для автономного возвращения мобильного робота в среде без фиксированных точек отсчета. Экстремальная робототехника: Сборник докладов всероссийской научно-технической конференции. — СПб: Изд-во «Политехника-сервис». 2015. С. 356–361.
10. Кандрашина Е.Ю., Литвинцева Л.В., Поспелов Д.А. Представление знаний о времени и пространстве в интеллектуальных системах.// М.,Наука, 1989
11. Ющенко А.С. Диалоговое управление роботами на основе нечеткой логики. Экстремальная робототехника: Сборник докладов всероссийской научно-технической конференции. — СПб: Изд-во «Политехника-сервис». 2015. С. 143-146.
12. 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
13. Ющенко А.С. Состояние и перспективы диалогового управления роботами. Труды Института психологии РАН, «Актуальные проблемы психологии труда инженерной психологии и эргономики», вып. 7 /Под ред. А.А.Обознова и А.Л.Журавлева. – М., Изд. «Институт психологии РАН», 2015, с.408-423.

B. Katalinic[1], A.Ya. Ksenzenko[2], S.V. Kuvshinov[2], Yu.S. Marzanov[2], E.A. Pryisev[2], V.E. Pryanichnikov[2], R.V. Khelemendik[2], S.R. Epikov[2]

THE DEVELOPMENT OF DISTRIBUTED SOFTWARE AND HARDWARE FOR «ROBOTARIUMS»

[1]Vienna Technological University, Austria;
[2]Keldysh Institute of Applied Mathematics (RAS), MSTU «STANKIN»,RSUH, InternationalLaboratory «Sensorika», Moscow, Russia
v.e.pr@yandex.ru

Abstract

The article presents results of development of basic hardware and software elements of the network associated laboratories-robotariums, in the framework of the project "Intellectual Robotronics" organized by the Central European branch of the International Academy of Eengineering in conjunction with KIAM Russian Academy of Sciences, IINET State University for Humanitys, the universities of Russia, Croatia and Austria. In the framework of this network this equipment includes access to the entire spectrum of the

developed mechatronic devices and mobile robot system with remote charging and exchange of video streams, as well as to the means of 3D-prototyping, placed in organizations-participants, to their methodological developments. Mobile robots and their simulation models are repeating the basic functionality and appearance of significantly more difficult and expensive robotic complexes (RTC) of Ministry for extreme situations and other agencies, that can effectively conduct the training of the operators of such RTC and develop integrating software ("middleware"), create the knowledge representation technology and automatic generation of action plans.

The paper was partially supported by the Russian Foundation for Basic Research, project No. 16-07-01264a, 16-07-00935a, 16-07-00811a.

Keywords: network robotarium, hardware and software for simulation of robotic systems, knowledge representation and pentalogia, intellectual robotronics.

Б. Каталинич[1], А.Я. Ксензенко[2], С.В. Кувшинов[2], Ю.С. Марзанов[2], Е.А. Прысев[2], В.Е. Пряничников[2], Р.В. Хелемендик[2], С.Р. Эпиков[2]

РАЗРАБОТКА РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫХ РОБОТАРИУМОВ

[1]Венский технологический университет, Австрия;
[2]ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, МГТУ «СТАНКИН», МИНОТ РГГУ,
Международная лаборатория «Сенсорика», Москва, Россия
v.e.pr@yandex.ru

Аннотация

В статье приведены результаты разработки базовых программно-аппаратных элементов сети ассоциированных лабораторий-роботариумов, в рамках проекта «Интеллектуальная роботроника» реализуемого Центрально-Европейским отделением Международной инженерной академии совместно с ИПМ им. Келдыша Российской Академии наук, МИНОТ РГГУ, университетами России, Хорватии и Австрии. В рамках этой сети предоставляется доступ ко всему спектру разработанных мехатронных устройств и мобильных роботов с системой дистанционной зарядки и обмена видеопотоками, а также к средствам 3D-прототипирования, размещенным в организациях-участниках, к их методическим разработкам. Мобильные роботы и их модели в симуляторах повторяют основные функциональные возможности и внешний вид существенно более тяжелых и дорогостоящих робототехнических комплексов (РТК) МЧС и других ведомств, что позволяет эффективно проводить подготовку операторов таких РТК, а также разрабатывать интеграционное программное обеспечение («middleware»), средства представления знаний и автоматической генерации планов действий.

Работа частично поддержана Грантами РФФИ No. 16-07-01264a, 16-07-00935a, 16-07-00811a.

Ключевые слова: сеть роботариумов, программно-аппаратные симуляторы робототехнических комплексов, представление знаний и пенталогика, интеллектуальная роботроника.

Введение

В настоящей статье рассмотрены ключевые направления разработки перспективных интеллектуальных робототехнических комплексов. Первая проблема - необходимость унификации процедуры встраивания различных мехатронных устройств через создание соответствующего интеграционного программного обеспечения. Это позволяет существенно сократить путь перехода от неизбежного и дорогостоящего строительства низкоуровневых сенсорных и управляющих систем к разработке верхнего уровня систем управления (СУ). Вторая проблема — недостаточная разработка дедуктивных механизмов и способов представления знаний для интеллектуализации СУ. Решение этих проблем осложняется отсутствием системной подготовки соответствующих специалистов - так называемых «инженеров по знаниям». Нам удалось создать специализированные программно-аппаратные средства - пространственно распределенные робототехнические лаборатории (рис.1), предоставляющие полный доступ ко всем входящим в них мехатронным устройствам удаленно через Интернет. Это позволило разработать эффективную образовательную технологию, опирающуюся на межвузовскую сеть, созданную Международным институтом новых образовательных технологий РГГУ совместно с Институтом прикладной математики им.Келдыша Российской академии наук (ИПМ), и Международной лабораторией «Сенсорика». В рамках предложенного подхода были разработаны и изготовлены 10 мобильных роботов АМУР, с которыми интегрированы три мобильных робота Robotino (в том числе с манипулятором-хоботом от фирмы Festo) и промышленные манипуляторы. Получили решения проблемы синхронизации, учета времени задержки, и

разграничения прав доступа, а также строятся mesh-сети с подвижными ретрансляторами. Реализация системы позволила решить учебные проблемы в рамках лабораторных практикумов, тесно связанных с выполнением актуальных НИР [1-7].

Создание программно-аппаратных средств и обучающих технологий

Изначально решаемые нами проблемы возникли из необходимости удаленного теле-перепрограммирования сенсорных и управляющих систем (СиУС), разработанных и установленных на мобильных роботах Brokk-110D и Brokk-330. Эти роботы были перестроены для выполнения операций в опасных зонах с ограниченным доступом человека. Заказчикам была необходима возможность изменять СиУС в ходе исполнения миссий без остановки роботов, встраивать новые мехатронные устройства и датчики сторонних производителей. Поэтому были разработаны соответствующие средства дистанционного доступа и многокамерные зрительные системы.

Рисунок 1 – Комплекс мобильных роботов АМУР, пульты управления к ним показаны справа

Эти результаты нашли применение в учебно-научных роботизированных комплексах АМУР, была создана технология разделения процессов управления на основе интеграционного ПО («middleware»), позволяющего объединять сотни мехатронных устройств с возможностью удаленного доступа к ним, при этом обеспечивая динамическое изменение конфигурации компонентов системы без остановки роботов, автоматическое переключение при отказах, включая автоконфигурацию. Программное обеспечение поддерживает различные ОС, обеспечивает встраивание новых драйверов для датчиков и приводов, инсталлируемых даже в полевых условиях. Потоки данных были организованы в специальные структуры данных «шлейфы», а разложение задач управления на отдельные процессы явилось ключом к успеху для оперативного коллективного (параллельного) программирования и быстрого прототипирования. Обучение этому подходу студентов, помогает им избежать одной из проблем современного образования, связанной с «магнитофонным» усвоением лекций и отсутствием креативности. Предложенное нами решение этой проблемы состоит в том, чтобы мотивировать студентам для участия в НИР в качестве «инженеров по знаниям», научить их строить эффективные формализации заданий и необходимые алгоритмы. В качестве базы таких учебных НИР были разработаны мобильные роботы АМУР, состоящие из корпусов, гусениц или двух колес (дифференциальный привод) или шагающих механизмов, ТВ-камер (от 1 до 6), видеосерверов, ультразвуковых локаторов (измеряемые дальности 50…3000 мм), одометров, бортового контролера, аккумуляторов и зарядных устройств, четырех аналоговых и 16 on/off каналов, силовых ключей с ШИМ (PWM) и ПИД-регуляторами 2-10А (12…32В), микро-РС на борту и удаленного ПК, связанного через Wi-Fi на максимальной дистанции до 50 м или до 1 км с дополнительными антеннами, а также ТВ-модуля стороннего наблюдения через Wi-Fi-«спутник» с PTZ (Pan, Tilt, Zoom) и оптическим зуммом >10х. Мобильные роботы АМУР работают под Linux на языках Python, C ++, по распределенной технологии для программирования всех видов обработки сенсорных и видеоданных, с логическими фильтрами на удаленном компьютере и/или на борту. В режиме реального времени все данные фиксируются в шлейфах (DTF), отражающих все детали работы в течение недели/месяца функционирования мобильных роботов. Шлейфы DTF обеспечивают не просто запись данных в файлы, но также синхронизацию данных, экстраполяцию и интерполяцию, избегая проблем задержек передачи данных и образования пробелов в потоке данных за счет соответствующей быстрой

логической фильтрации. Массо- габаритные параметры реализованных мобильных роботов АМУР-5, АМУР-6, АМУР-7, АМУР-105 и АМУР-107 следующие: вес - 17-23 кг, размеры - L580xB510xH340 мм. Развиваемая скорость - 10…750 мм/с, время автономной работы — от 1 до 2 ч. Важным достоинством нашего подхода является применение разработанного собственного симулятора или построение математических моделей на основе симулятора V-Rep, в сочетании с навеской дополнительных корпусных элементов на реальные мобильные роботы Амур, имитирующие другие (более дорогостоящие) комплексы. Это позволяет проводить полноценную подготовку операторов роботов с существенно более низкими затратам, используя как действующие макеты, так и возможности виртуальной «реальности» (рис. 2,3).

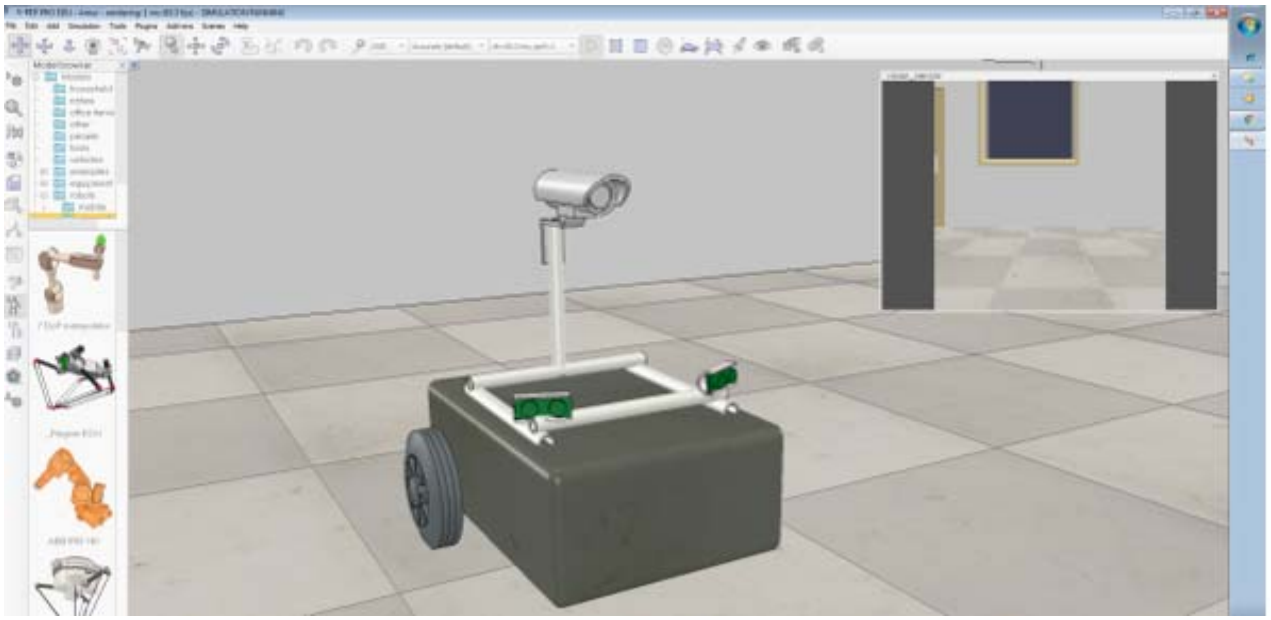


Рисунок 2 – Виртуальная математическая модель (с применением симулятора V-REP), разработанная для робота АМУР-105 (МЛ «Сенсорика»), который используется в качестве носителя сменных оболочек (корпусных деталей) - макетов робототехнических комплексов типа Уран (рис.3)

Реализация базовых элементов программно-аппаратного комплекса

Система бесконтактного энергоснабжения автономных роботов (СБЭ). Одним из найденных решений, которые применялись в наших разработках была система СБЭ, предназначенная для обеспечения оперативного автоматического или полуавтоматического пополнения запаса электроэнергии аккумуляторов (АКБ) мобильных робототехнических устройств без использования непосредственного подключения электрическими контактами для вариантов наземной или подводной сред функционирования. Целесообразность применения этой системы в составе подводных робототехнических комплексов (РТК) обуславливается возможностью проведения продолжительных по времени глубинных работ без подъема на поверхность для подзарядки или смены бортовых АКБ. При этом исключается ряд затратных по времени и трудоемкости действий: подъем, разгерметизация, подзарядка или смена батареи, последующая герметизация, проверка функционирования, погружение, поиск и нахождение рабочей зоны проведения работ. Исключение необходимости периодического подъема автономного робота существенно повышает эффективность подводных работ, особенно с увеличением глубины их проведения (табл.1). Одновременно с подзарядкой обеспечивается высокоскоростная передача данных и многоканального видео.

Принцип функционирования системы бесконтактного энергообеспечения - использование электродинамической индукции. Система состоит из двух частей: излучающего устройства и принимающего устройства. Излучающее устройство (ИУ) включает в себя: преобразователь электрической энергии, как правило, постоянного тока, в мощный ток высокой частоты и преобразователь этого тока в электромагнитное поле, излучаемое в нужном направлении. ИУ устанавливается на стационарной, или малоподвижной части робототехнического комплекса и имеет устойчивое гарантированное энергообеспечение (рис.4). Принимающее устройство состоит из приемной антенны, преобразующей принятые электромагнитные колебания в высокочастотный ток, и из согласующего устройства, преобразующего принятую энергию в нормализованный постоянный ток

с параметрами, пригодными для штатного режима зарядки бортового аккумулятора автономного робототехнического устройства. Принимающее устройство устанавливается на полностью автономном роботе, бесконтактное энергоснабжение которого необходимо обеспечить. Основной проблемой разработки таких устройств является обеспечение электромагнитной совместимости всех систем РТК в условиях воздействия на них значительного электромагнитного излучения, а также обеспечение независимости и параллельности процессов зарядки бортовых батарей и передачи данных с высокими скоростями (до 10 мбит/с).

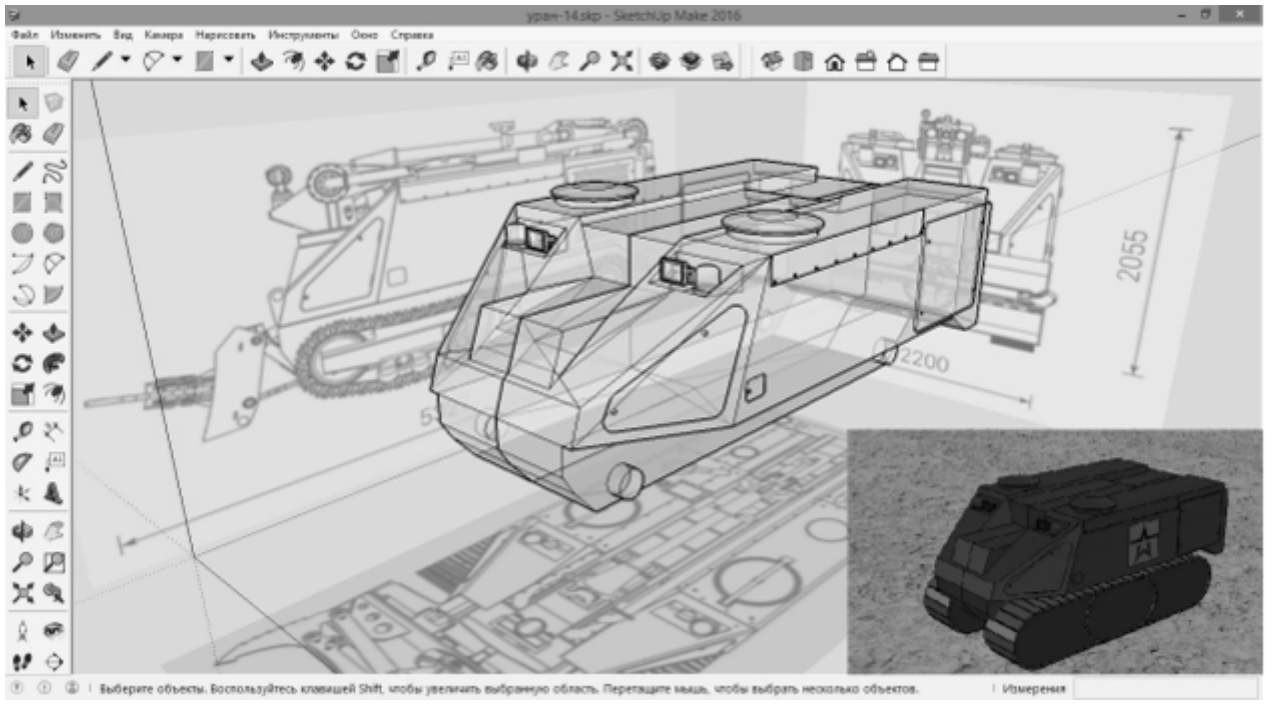


Рисунок 3 – Схематический чертеж робота Уран-14 для построения макета в составе роботариума и для встраивания в собственный разработанный мультиагентный симулятор

Табл.1. Технические характеристики системы бесконтактного энергообеспечения подводных и наземных автономных роботов (правый столбец)

Удаленность эффективной передачи энергии	0 – 20 мм	10 – 30 мм
Получаемая мощность	20 Вт	300 Вт
К.п.д. системы	25 – 45%	20 – 35%
Напряжение питания передающего устройства	+48 В	~220 В
Вес приемного устройства	450 г	1800 г

Антропоморфный манипулятор для сервисных роботов. Существует множество задач, в которых роботу необходимо взаимодействовать с объектами, предназначенными, прежде всего, для человека. Например, это открытие обычной двери или управление электокаром на автоматизированном складе, квадроциклом. Обычный манипулятор не годится для решения такой задачи, так как управление ручками руля квадроцикла, приспособлено исключительно для человека. Для замены человека в контуре управления нужен особый тип манипулятора. Таким образом, потребовалась разработка антропоморфного манипулятора для сервисных роботов, способных заменить оператора для решения задач типа нажатия кнопок, поворот тумлеров, взятия инструмента и т. п.

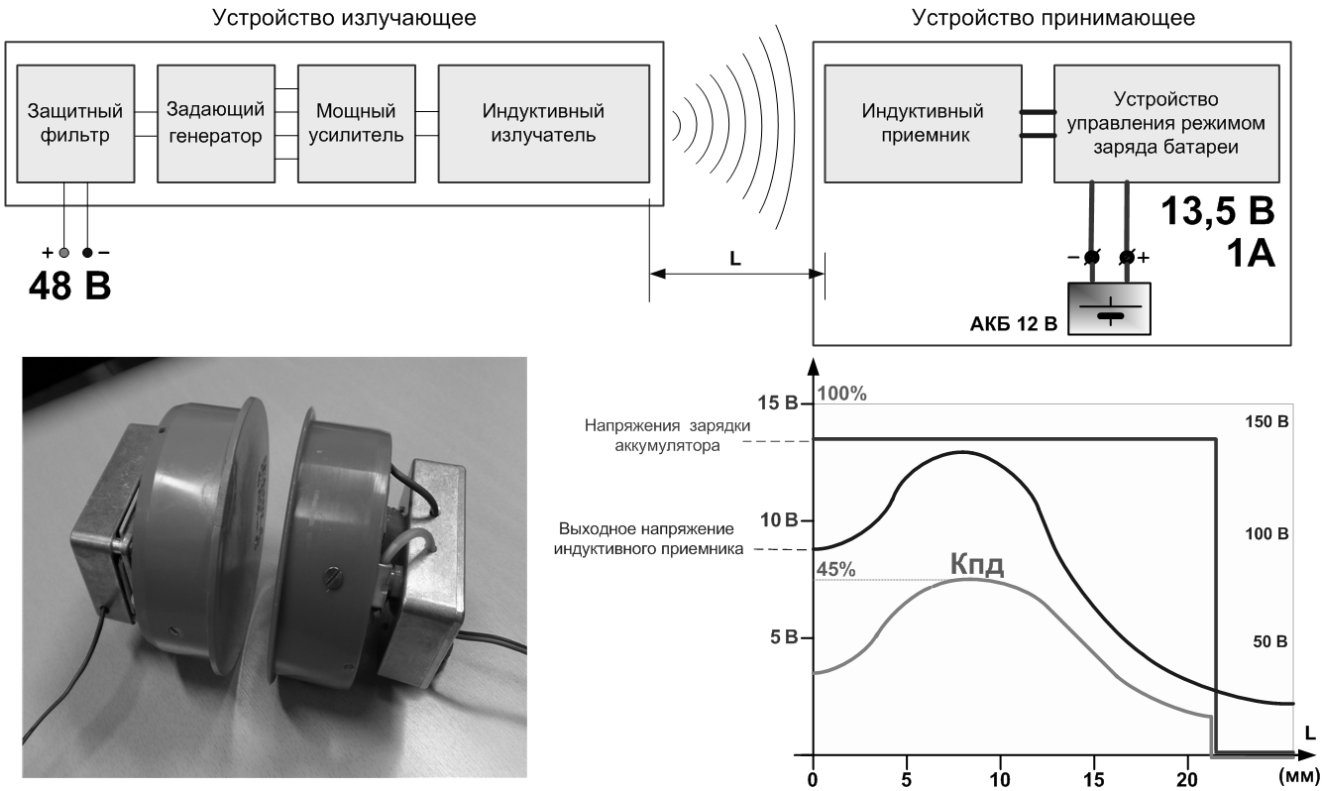


Рисунок 4 – Мобильный робот Амур-205, схема бесконтактного энергоснабжения и передачи данных

Заключение

Разработанное технологическое оборудование и программное обеспечение могут использоваться для решения широкого круга задач управления мехатронных устройств, а также для учебных задач. Причем если для одиночных роботов возможны и другие решения, то для больших распределенных мобильных робототехнических комплексов предложенный подход практически безальтернативен. Полученные результаты могут быть использованы для отработки технологий представления знаний и развития новых эвристических методов интеллектуализации роботов с расширенными возможностями и для построения новых креативных образовательных технологий.

1. Пряничников В.Е., Биелич Т., Вицан Д., Каталинич Б., Кирсанов К.Б., Кувшинов С.В., Марзанов Ю.С., Подураев Ю.В., Хелемендик Р.В., Прысев Е.А., Углешик А., Харин К.В. Разработка образовательных технологий и сети ассоциированных лабораторий-роботариумов . Информационно-измерительные и управляющие системы, М.: Радиотехника. 2015, т.13, N7 – ISSN 2070-0814, С.7-25.
2. Pryanichnikov V.E., Andreev V.P. Intellectulazation of special mobile robots, including return algorithm to a zone of stable RC // Proceedings of the XXI Int. Conference on Extreme Robotics. St. Peterburg: Poliectnika-service. 2010. P. 46–49.
3. Pryanichnikov V.E., Andreev V.P., Prysev E.A. Group control of mobile robots, based on the net-technologies // Proceedings of the Int. conference on Robotics for Security & Space (Planet & Earth rovers). St. Peterburg: Poliectnika service. 2010. P. 279–283.
4. Katalinic B., Pryanichnikov V.E., Ueda K., Kukushkin I., Cesarec P., Kettler R. Bionic Assembly System: hybrid control structure, working scenario and scheduling // Proceedings of 9th National Congress on Theoretical and Applied Mechanics, Brussels. 2012. P. 111–118.
5. Pyanichnikov V.E. Algorithmic base for remote sensors of mobile robots // Mechatronics, Automation, Control. 2008. № 10(91). P. 10−21.
6. Kirsanov K., Levinsky B., Pryanichnikov V. Integrating software for intelligent robots // Informational-Measuring and Control Systems, Radiotechnika. 2009. V. 7. № 6. P. 35−43.

7. Kirillchenko A.A., Pryanichnikov V.E., Rogozin K.V. Limits of validity and reliability of proofs. Scepticism in mathematics, functions, and traditions // Information-Measuring and Control Systems. 2013. V. 11. № 4. P. 57–65.

V.E. Pryanichnikov[1], D.K. Stepanova[2]

PROTOTYPING LASER COMMUNICATIONS IN THE GROUP OF MOBILE ROBOTS

[1]Keldysh Institute of Applied Mathematics (RAS);
MSTU «STANKIN» International laboratory «Sensorika»Moscow, Russia
[2]Moscow Institute (University) of Physics and Technology
v.e.pr@yandex.ru

Abstract

Laser communications for some applications are considered as an alternative or complementary to radio communication for the transmission of large amounts of data over long distances in space. The optical transmission line is characterized by high speeds combined with low power consumption and low weight of the payload, which is an advantage for use on board of satellites, space telescopes and scientific space probes. Optical communications also achieves better indicators than the radio when communicating with the secure channel from interference, interception zones of extreme conditions. This work aims to develop a terminal laser communication for a group of mobile robots and is particular focused on creating a guidance system, capture and tracking (GCT). The main objective is to analyze system requirements of GCT to provide a laser optical communication terminal development and testing of the obtained solutions on the prototype. In the course of this work based on the analysis of requirements to the communication terminal and model building for data transmission between mobile robots has been proposed the idea of the construction of the terminal. The next stage was to create a mathematical model of the control system and analysis of stability. A separate part of the work is also devoted to the development of a system of determining the robot's orientation and stabilization system. In the course of work was also created a prototype and all necessary algorithms are implemented in software. At the moment the laser terminal has passed the tests and reached permissible values of performance in the existing restrictions.

The paper was partially supported by the Russian Foundation for Basic Research, project No. 16-07-01264a, 16-07-00935a, 16-07-00811a.

Key words: optical communication, mobile robots, guidance systems, capturing and tracking.

В.Е. Пряничников[1], Д.К. Степанова[2]

МАКЕТИРОВАНИЕ ЛАЗЕРНОЙ СВЯЗИ ГРУППЫ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ

[1]ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, МГТУ «СТАНКИН», МИНОТ РГГУ,
Международная лаборатория «Сенсорика», Москва, Россия;
[2]ФГОУ ВПО «Московский физико-технический институт (ГУ)»
v.e.pr@yandex.ru

Аннотация

Лазерная связь в ряде применений рассматривается как альтернативная либо дополняющая к радио связи для передачи больших объемов данных на большие расстояния в пространстве. Оптическая линия передачи отличается высокими скоростями передачи в сочетании с небольшим энергопотреблением и низким весом полезной нагрузки, что является несомненным преимуществом для применения на борту спутников, космических телескопов и научных космических зондов. Оптическая связь также достигает лучших показателей работоспособности чем радио при связи с защищенностью канала от радиоизлучений, перехвата зонах экстремальных условий.

Данная работа нацелена на разработку терминала лазерной связи для группы мобильных роботов и в частности сосредоточена на создании системы наведения, захвата и слежения (НЗС). Главной задачей работы является анализ требований к системе НЗС для обеспечения лазерной оптической связи, разработки терминала и тестировании полученных решений на прототипе. В ходе данной работы на основе анализа требований к терминалу связи и построения модели передачи данных между мобильными роботами была предложена идея конструкции терминала. На следующем этапе была создана математическая модель системы управления и проведен анализ устойчивости. Отдельная часть работы также посвящена разработке системы определения ориентации робота и системы стабилизации. В ходе работы также был создан прототип и все необходимые алгоритмы реализованы

программно. На данный момент лазерный терминал прошел тестирование и достиг допустимых параметров работоспособности при имеющихся ограничениях.

Работа частично поддержана Грантами РФФИ N 16-07-01264а, 16-07-00935а, 16-07-00811а.

Ключевые слова: оптическая связь мобильных роботов, система наведения, захвата и слежения.

1. Введение

Радиочастотная (РЧ) связь заметно уступает оптической связи в ряде применений [1]. По сравнению с РЧ связью оптическая связь способна обеспечить более широкий спектр и, следовательно, более высокую скорость передачи данных; оптический сигнал сложнее незаметно перехватить, что делает данный вид связи более защищенным [2]. Коэффициент усиления оптической антенны выше чем у РЧ при одинаковой эффективности в силу более острой диаграммы направленности оптической антенны и, таким образом, более высокой концентрации энергии в лазерном пучке чем у РЧ. Радио антенны в принципе могут достичь того же порядка концентрации энергии в пучке, однако апертура антенны будет возрастать пропорционально с коэффициентом усиления, увеличивая также ее вес и размер [3] и делая невозможным использование на небольших роботах. Преимущество высокой направленности оптических антенн приводит к необходимости решения задачи точного наведения лазерного луча [4]. Важность системы наведения, захвата и слежения (НЗС) значительно возрастает в следствии зависимости скорости передачи данных от точности наведения: чем ниже точность, тем больше потерь соединения будет происходить во время сеанса связи и меньше информации будет передаваться [5]. Такие важные и влияющие на конструкцию лазерного терминала параметры, как расходимость оптического пучка и мощность передатчика, зависят от точности системы НЗС. Чем ниже точность, тем выше должны быть расходимость пучка и мощность передачи должна для обеспечения одной и той же скорости передачи данных. Целью данной работы является разработка лазерного терминала и системы НЗС для экспериментального тестирования лазерной связи между двумя и более мобильными роботами [6-12].

2. Возможные конфигурации группы мобильных роботов

В ходе данной работы рассматривались несколько возможных конфигурации мобильных роботов, действующие на опасном участке, и связей между ними. В основе каждой из конфигураций лежат следующие предположения: группа мобильных роботов, собирающих информацию в опасной зоне, осуществляет передачу данных о зоне и телеметрию через беспилотный летательный аппарат (БЛА), работающий в качестве ретранслятора, на станцию, управляемую людьми и находящуюся за пределами опасной зоны. Таким образом, оптическая линия связи может быть установлена между:
1 - мобильными роботами; 2 - мобильными роботами и ретранслятором; 3- ретранслятором и станцией.

Каждый из сценариев подразумевает разработку оптического терминала, отвечающего определённым и специфическим в каждом случае требованиям.

3. Проектирование системы

Определение требований к проектированию сложной оптической системы и системы управления НЗС является залогом работоспособности системы. В ходе данной работы были выведены следующие требования к разработке терминала.

Скорость передачи данных. Для определения требований к скорости передачи данных была произведена оценка объема передаваемых данных, производимый мобильным роботом. В большинстве случаев на опасных объектах, где люди предпочитают мобильные роботам проводить все необходимые операции, человек должен иметь представление о пространстве, в котором робот работает. Поэтому основным видом передаваемой информации является видео в режиме реального времени; верхний порог скорости передачи данных, удовлетворяющий этому условию, был выбран равным 150 Мб/с.

Расстояние между мобильными роботами. В рамках всевозможных конфигураций, в которых мобильные роботы могут работать в экстремальных условиях, расстояние между роботами, роботами и ретранслятором, ретранслятором и станцией могут составлять от 10м до нескольких километров. Таким образом, верхняя граница значения данного требования была выбрана равной 3 км.

Размер оптического терминала. Объем оптического терминала, располагающегося для небольшом мобильном роботе, является критической величиной. Таким образом, в ходе работы был выбран компромисс между размерами, весом терминала и требованиям с точки зрения «выносливости» робота. Одним из основных факторов, ограничивающих миниатюризацию терминала, является наличие телескопа. Поэтому выбор телескопа был сделан в пользу Ньютоновской по сравнению с телескопом Кассегрена.

Мощность оптического излучения, которую может выделить мобильный робот для работы лазера и системы НЗС, является ограниченной. В ходе разработки требований к терминалу связи мощность излучения лазера была установлена равной 0.5 Вт, максимальная мощность потребления системы НЗС – 2 Вт. Прочие требования к лазерному терминалу показаны в табл.1.

Параметр	**Значение**	**Параметр**	**Значение**
Мощность передатчика	0.5 Вт	Масса зеркала	165г
Длина волны лазера	1550 нм	Размер зеркала	200x85мм
Расстояние между передатчиками	3 км	Максимальное расхождение пучка	3 град
Масса терминала	До 3 кг	Масса системы НЗС	400г.

Таблица 1. Параметры/требования к системе наведения, захвата и слежения лазерного терминала

4. Описание прототипа лазерного терминала

После анализа требований и моделирования работы оптического терминала в среде Matlab, был создан его прототип с целью доказательства его работоспособности. Низкая стоимость компонентов являлась ключевым требованием в проектировании. Терминал состоит из следующих подсистем: оптическая, НЗС, электронная.

Оптическая подсистема. На принимающей стороне входящий пучок, представленный плоской волной, попадает на плоское зеркало системы наведения. Зеркало перенаправляет оптический сигнал в основной телескоп диаметром 90мм и фокусным расстоянием 300 мм. Здесь оптический пучок делится на два с помощью расщепителя. Большая часть пучка попадает на лавинный фотодиод, а остальная часть сосредотачивается на матрице CMOS для сбора информации об ошибке наведения. Эта информация используется в качестве обратной связи для системы наведения, захвата и слежения. Передающая часть состоит из фотодиода и фокусирующей линзы необходимой для калибровки дивергенции луча и непосредственно установлена на системе наведения. В качестве модуляции выбрана широтно-импульсная модуляция. [20], [21].

Электроника и программное обеспечение. Электронная подсистема разделена на цепочку восстановления аналогового сигнала, которая усиливает и очищает сырые оптические сигналы, и цифровой блок обработки пакетов, реализованный на ПЛИС и управляющий пакетами низкого уровня. Резервный канал связи также присутствует на платформе и основан на приемопередатчиках Xbee дальнего радиуса действия. Основное программное обеспечение системы реализовано на микрокомпьютере BeagleBone Black. Он запускает основное программное обеспечение: прогноз положения, лазерный и радио передатчик, контроль связи I2C, часть программного обеспечения НЗС. Языком программирования был выбран Java, благодаря своей надежности и простоте использования. Для того увеличения надежности системы каждая внутренняя функция представлена независимым блоком и осуществляет обмен информацией через общую шину.

Система наведения, захвата и слежения(НЗС) должна обеспечить максимально возможную точность наведения оптического луча (менее 3 град). Подход к разработке системы НЗС состоит в следующем: лазерный диод и главное зеркало оптической системы, которое перенаправляет оптический луч в телескоп, вращаются в двух плоскостях – тангажа и рысканья. Зеркало и лазер установлены на одной горизонтальной оси вращения; каркас для вращения зеркала установлен на мобильной платформе. Вращение по двум углам осуществляется с помощью бесколлекторных двигателей постоянного тока (БДПТ). Управление мотором происходит с процессора системы НЗС через драйвер. В качестве компьютера НЗС была выбрана плата Arduino Due со встроенным 32-bit ARM core микроконтроллером Atmel SAM3X8E ARM Cortex-M3 CPU [5]. Компьютер НЗС, помимо контроля двигателей, обеспечивает сбор данных с сенсоров, вычисление положения зеркала и коммуникации с главным компьютером. Система НЗС включает в себя подсистему сенсоров, которая распределена по всей платформе, и подсистему двигателей (Рис.1).

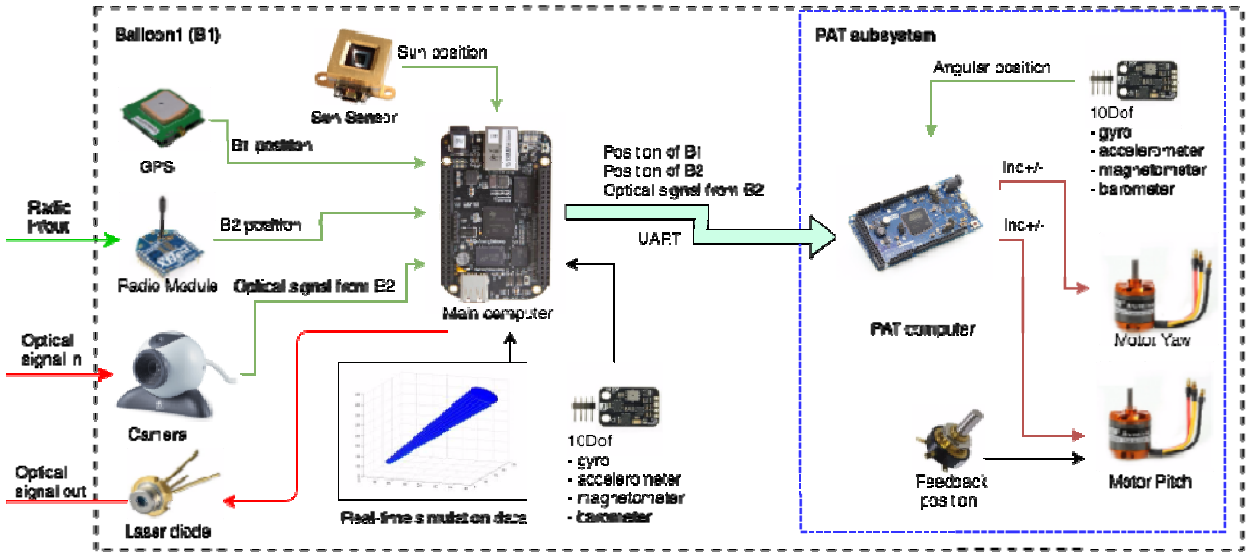


Рисунок 1 – Архитектура системы НЗС

Точное определение ориентации мобильного робота является критической задачей в разработке системы НЗС. Акселерометр, гироскоп и магнитометр установлены на платформе с целью определения ориентации всей платформы. Магнитометр расположен максимально далеко от двигателей и металлических частей телескопа для минимизации электромагнитных шумов, влияющих на его работу. Другой датчик с акселерометром и гироскопом установлен на задней поверхности зеркала для определения положения зеркала. Потенциометр расположен на валу мотора, регулирующего положение зеркала по углу рысканья, для определения угла вращения мотора. Сбор и обработка данных с сенсоров, расположенные на системе НЗС, происходит на компьютере НЗС; сбор и обработка данных с сенсоров, расположенных на платформе, происходит на главном компьютере. Протокол общения между главным и НЗС компьютерами осуществляется с помощью серийного порта.

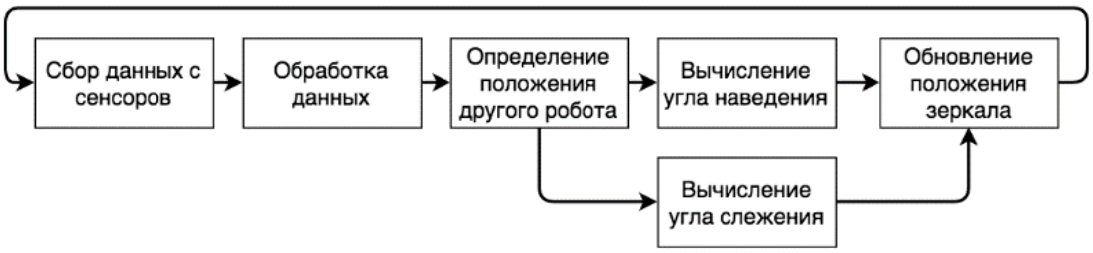


Рисунок 2 – Алгоритм работы системы НЗС, представленный в виде конечного автомата

Разрабатываемая система управления включает в себя три части: НЗС компьютер, ПИД-регулятор и нагрузку (Рис 3.). Положение угла тангажа и рыскания изменяются в одном цикле. Нагрузка состоит из зеркала, лазерного держателя и датчика 10dof, размещенного на зеркале. Обратная связь по ориентации зеркала и абсолютному вращению потенциометра подаются на микроконтроллер, который генерирует синусоидальный сигнал ШИМ и управляет мотором через драйвер.

В ходе работы были разработаны структура и драйвер системы НЗС. Конструкция состоит из держателя зеркала и рамки. Держатель зеркала с одной стороны закреплен на валу двигателя, а с другой – на металлическом держателе лазера, который соединен с валом. Рамка, предназначенная для держателя зеркала, фиксируется на валу двигателя рысканья. Датчик 10dof прикреплен к держателю зеркала на пересечении двух осей вращения. Двигатель рысканья размещен на платформе. Расчет центра масс конструкции НЗС расположен на пересечении осей вращения с целью предотвращения колебаний двигателя. Программа Solid Works позволяет сконструировать структуру с учетом положения центра масс и моментов инерции вокруг трех осей.

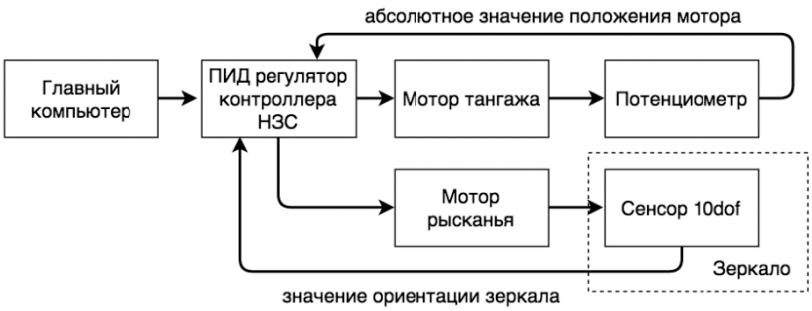


Рисунок 3 - Алгоритм цикла управления в системе наведения, захвата и слежения

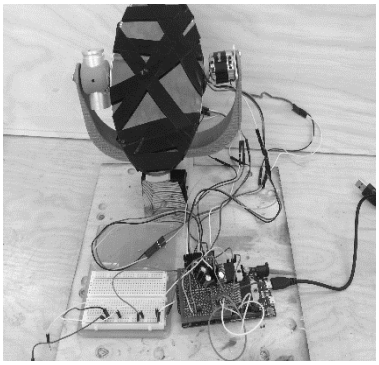


Рисунок 4. Реализация системы наведения НЗС

5 Экспериментальное исследование прототипа

Подсистемы НЗС, такие как система стабилизации и система определения ориентации, оптическая подсистема на данном этапе разработки терминала были испытаны отдельно. Система стабилизации была протестирована в лабораторных условиях с использованием двух прототипов НЗС, а система определения ориентации была протестирована во время «полевых» испытаний. Схема эксперимента представлена на рис.5. Проверка системы стабилизации состояла отклонении одной платформы на углы в пределах от 0 до 30 град. и определения точности системы НЗС по двум углам.

В силу зашумленности измерений датчика 10dof, механических перекосов в креплении зеркала, несовершенства 3D печати, сдвига центра масс, определение угла тангажа и (по сравнению с углом рысканья) было менее точным. Таким образом, было установлено, что ошибка определения угла тангажа составила 4.3 град, а угла рыскания - 1.2 град. На рис. 6 показаны изменения углов рысканья и тангажа, отклик системы управления для угловых отклонений a, равных 5, 15, 20 и 30 град соответственно. Смещение тангажа включало вращение вокруг оси - быстрое (40 град / с) и умеренное (20 град /с). Скорость вращения определялась с помощью гироскопа. На рис. 6 на графиках слева визуализировано поведение системы в плоскости рыскания B1 и B2 соответственно, а два справа – угла тангажа. Синие точки обозначают время, когда ошибка наведения обеих систем составляет менее 7 град, и розовые точки показывают время, когда ошибка наведения обеих систем составляет менее 4 град. Точность наведения системы НЗС зависит от углового смещения, а максимальная допустимая точность, определенная в ходе эксперимента, составила 5.4 град при a = 16 град. Таким образом, в течение 40 секунд эксперимента число соединений между двумя лазерными терминалами составило 6 и 20 с расхождением пучка, равным 4 и 7 град соответственно. Таким образом, производительность системы достаточна для обеспечения скорости передачи данных равной 50Mbs.

6. Выводы

Данная работа была посвящена разработке лазерного терминала. Из обзора литературы стало ясно, что оптическая связь нашла большое применение в проектах, связанных со спутниками. Однако, большой интерес представляют и случаи работы мобильных роботов в экстремальных условиях; был отмечен высокий потенциал таких систем для использования при передаче видеопотоков между мобильными роботами, роботами и ретрансляторами. Основываясь на выведенных требованиях к системе, были разработаны конструкция терминала, система определение ориентации платформы, система НЗС. Низкоуровневое управление бесколлекторным мотором было реализовано совместно с ПИД-регулятором; для определения ориентации было предложено комплексирование алгоритмов Magwick и метода Триад. Необходимое программное и аппаратное обеспечение (конструкция, алгоритм ориентации, алгоритм обработки датчиков, протоколы связи, алгоритм управления двигателем, ПИД-регулятор) были разработаны и система была испытана в лабораторных условиях в нескольких итерациях. Отдельные подсистемы НЗС показали положительные результаты в лабораторном и «полевом» тестировании и доказали целесообразность подхода к разработке требований к лазерному терминалу и системы НЗС. В итоге, точность наведения системы НЗС для реализации оптической связи, например на стратосферных шарах составила 5 град, обеспечивая таким образом скорость передачи данных близкую к 50Mbs. На следующих этапах работы должны быть исследованы способы оценки и гашения вибраций, их влияния на точность наведения, а также разработан окончательный вариант аппаратного и программного обеспечения этой системы.

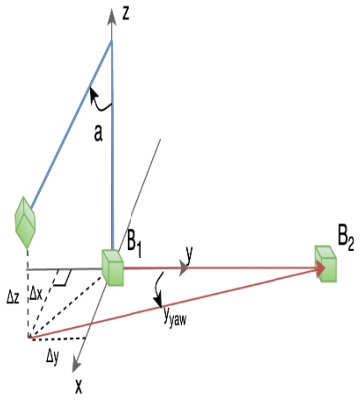


Рисунок 5 – Схема эксперимента по тестированию системы стабилизации

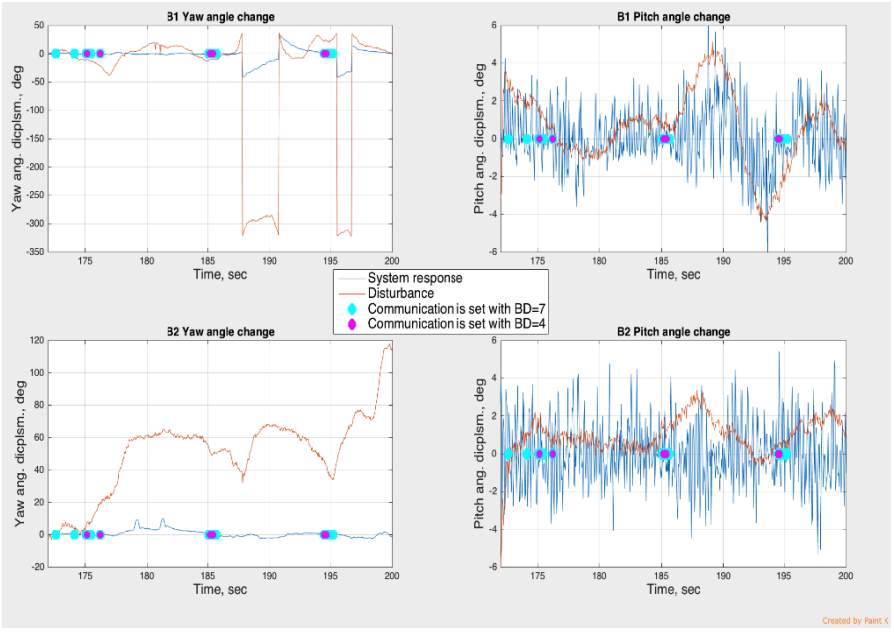


Рисунок 6 – Визуализация возможностей системы НЗС в погашении возмущений при различных углах отклонения в двух плоскостях и выделение промежутков времени, при которых установление оптической связи возможно

1. V. W. S. Chan, “Free-space optical communications,” J. Lightwave Tech., vol. 24, no. 12, pp. 4750–4762, 2006.
2. Ссылка:http://www.parabolicarc.com/2015/04/26/digital-solid-state-propulsion/.
3. NASA, “Small Spacecraft Technology - State of the art,” Ames Research Center, Moffett Field, California, Mission Design Division, 2015.
4. Keizo Nakagawa, Akio Yamamoto,“Pleminary design of LaserUtilizing Communications equipment (LUCE) installed on Optical inter-orbit communications engineering test satellite”, National Space Development Agency of Japan (NASDA).
5. Seshupriya Alluru, Janise. Y. McNair ”An Optical Payload for Cubesats”, Wireless And Mobile Systems Laboratory, University of Florida, Gainesville.
6. Пряничников В.Е., Биелич Т., Вицан Д., Каталинич Б., Кирсанов К.Б., Кувшинов С.В., Марзанов Ю.С., Подураев Ю.В., Хелемендик Р.В., Прысев Е.А., Углешик А., Харин К.В. Разработка образовательных технологий и сети ассоциированных лабораторий-роботариумов . Информационно-измерительные и управляющие системы, М.: Радиотехника. 2015, т.13, N7 – ISSN 2070-0814, С.7-25.
7. Pryanichnikov V.E., Andreev V.P. Intellectulazation of special mobile robots, including return algorithm to a zone of stable RC // Proceedings of the XXI Int. Conference on Extreme Robotics. St. Peterburg: Poliectnika-service. 2010. P. 46–49.
8. Pryanichnikov V.E., Andreev V.P., Prysev E.A. Group control of mobile robots, based on the net-technologies // Proceedings of the Int. conference on Robotics for Security & Space (Planet & Earth rovers). St. Peterburg: Poliectnika service. 2010. P. 279–283.
9. Katalinic B., Pryanichnikov V.E., Ueda K., Kukushkin I., Cesarec P., Kettler R. Bionic Assembly System: hybrid control structure, working scenario and scheduling // Proceedings of 9th National Congress on Theoretical and Applied Mechanics, Brussels. 2012. P. 111–118.
10. Pyanichnikov V.E. Algorithmic base for remote sensors of mobile robots // Mechatronics, Automation, Control. 2008. № 10(91). P. 10−21.
11. Kirsanov K., Levinsky B., Pryanichnikov V. Integrating software for intelligent robots // Informational-Measuring and Control Systems, Radiotechnika. 2009. V. 7. № 6. P. 35−43.
12. Kirillchenko A.A., Pryanichnikov V.E., Rogozin K.V. Limits of validity and reliability of proofs. Scepticism in mathematics, functions, and traditions // Information-Measuring and Control Systems. 2013. V. 11. № 4. P. 57–65.

Yu.R. Kuzin

EXPERIENCE IN THE USE OF THE CURRENT TRANSFORMER AS SENSOR TO COMPENSATE THE SERVOMECHANISM

Bauman Moscow State Technical University
kuzin_yr@bmstu.ru

Abstract

The current transformer in the minor feedback loop has been used to compensate the servo system using motor current sensing. The transformer behaves like differentiator in the system bandwidth. This fact allows to resolve problem of direct current sensing and provides high robustness. Output signal of the transformer is very noisy, but noise is a good shaped to be filtered out by 2-poles RC-compensator. So compensator is playing the double role: the system correction to achieve required quality and the filtering of current derivative signal. Then feedback signal is digitized to be used for control. Feedback transformer is different from others: it's optimized by signal-to-noise ratio and must be big enough to avoid core saturation.

Keywords: servomechanism, current transformer, minor feedback loop, feedback control system.

Ю.Р. Кузин

ОПЫТ РАЗРАБОТКИ СЛЕДЯЩЕГО ПРИВОДА С ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ КОРРЕКЦИЕЙ НА ОСНОВЕ ТРАНСФОРМАТОРА В КАЧЕСТВЕ ДАТЧИКА ТОКА

НИИСМ МГТУ им. Н.Э.Баумана, Москва
kuzin_yr@bmstu.ru

Аннотация

Описывается метод параллельной коррекции следящего привода с использованием трансформатора тока в обратной связи. Трансформатор работает в дифференцирующем режиме в полосе пропускания системы. Это позволяет корректно обработать сигнал постоянного тока и обеспечивает низкую чувствительность привода к статическому моменту нагрузки. Сигнал производной от тока якорной цепи корректируется с помощью RC-цепи 2-го порядка, чтобы достичь желаемого качества системы. Благодаря большим постоянным времени корректирующая RC-цепь, кроме того, обеспечивает ослабление высокочастотного шума, содержащегося в сигнале на выходе трансформатора. После аналоговых преобразований сигнал тока используется для формирования управляющего воздействия. Трансформатор в обратной связи отличается способом использования: при его расчете оптимизируется отношение сигнал/шум, а также принимаются меры против насыщения сердечника, так как величина магнитной индукции в трансформаторе может достигать больших значений.

Ключевые слова: следящий привод, трансформатор тока, параллельная коррекция, система автоматического управления.

При проектировании высокоточного быстродействующего следящего привода приходится увеличивать коэффициент усиления по рассогласованию, чтобы выполнить требования технического задания. При этом возникает задача коррекции следящего контура с целью обеспечения запаса устойчивости и нужного качества переходного процесса. На этом этапе разработчик должен принять решение о способе реализации корректирующего устройства. Параллельная коррекция по сравнению с последовательной требует более сложных и дорогих технических решений. Однако она обладает рядом преимуществ, главное из которых – нечувствительность системы к параметрам неизменяемой части (объекта управления). Это общее свойство систем с глубокой отрицательной обратной связью. Нередко параллельная коррекция – единственный способ добиться желаемого качества работы системы. Реализация параллельной коррекции предполагает организацию местной обратной связи, когда управляющее воздействие формируется с учетом измерения какой-либо физической величины. Обычно измеряется скорость движения или ток двигателя. В первом случае систему нужно дополнить датчиком скорости. Для коррекции скоростной сигнал дифференцируется, чтобы получить вторую производную от положения [1]. Этот способ параллельной коррекции широко распространен, несмотря на конструктивное усложнение привода, благодаря простоте алгоритма и независимости от типа двигателя. Измерение тока конструктивно проще, а в системах без внешнего момента сил позволяет добиться высокого качества работы, применяя очень простые алгоритмы. Типовой пример чисто инерционной нагрузки - наведение средств видеонаблюдения. Однако, прямая обратная связь по току ограничивает способность привода сопротивляться статической внешней нагрузке, так как снижает

коэффициент усиления системы по отношению к возмущающему воздействию. В такой ситуации для местной обратной связи также применяют производную от тока.

Коротко рассмотрим виды датчиков тока:

- резистивный шунт;
- датчик на эффекте Холла;
- трансформатор тока.

Резистивный шунт обладает существенным активным сопротивлением, чтобы обеспечить уровень сигнала достаточно большой для последующей обработки. В сильноточном приводе шунт должен иметь большие размеры, чтобы рассеивать тепло. Зарубежная промышленность выпускает большое количество типов токовых шунтов, обладающих специальными свойствами, такими как высокая стабильность характеристик, низкий уровень собственного шума и стойкость по отношению к импульсным токам. Среди отечественных предприятий можно отметить ОАО "НИИ электронно-механических приборов" г. Пенза, предлагающее мощные шунты Р2-103, и ОАО "НПО "ЭРКОН" г. Нижний Новгород, которое производит безындуктивные фольговые чип-резисторы Р2-105 международных типоразмеров мощностью до 2 Ватт и номиналом от 1 мОм. Важно, что указанные изделия отечественных производителей включены в «Перечень электронной компонентной базы, разрешенной для применения при разработке, модернизации, производстве и эксплуатации вооружения, военной и специальной техники». Фактически, разработчик радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) военного назначения при подборе шунта ограничен в выборе между проволокой из манганина и шунтами Р2-103, Р2-105. Недостатком схем, использующих шунт для измерения тока, является отсутствие гальванической изоляции между силовой и измерительной частью, либо очень сложная ее организация.

Датчик Холла в качестве инструмента для измерения тока, возможно, самое подходящее решение в большинстве случаев, так как он достаточно мал даже при измерении тока в сотни ампер благодаря небольшому активному сопротивлению, которое теоретически может быть сколь угодно мало из-за иного физического принципа измерения тока по сравнению с шунтом. Кроме того, датчик Холла обеспечивает гальваническую изоляцию силовой и измерительной цепей. За рубежом выпускаются интегральные микросхемы, представляющие собой законченное полнофункциональное решение по измерению тока, основанное на этом эффекте. Главным недостатком таких устройств является их сложность, что служит причиной отсутствия подобных микросхем в Перечне ЭКБ. Самостоятельное изготовление датчиков Холла на неспециализированных предприятиях также не представляется возможным по той же причине. Поэтому разработчику РЭА военного назначения такие устройства недоступны.

Трансформатор тока обеспечивает гальваническую изоляцию, прост в изготовлении, а его габариты определяются желаемыми частотными свойствами. Основным ограничением на его использование в качестве измерительного устройства служит неспособность работать на низких частотах. Наличие нижней границы полосы пропускания у трансформатора кажется непреодолимым препятствием для его применения в следящем приводе, который напротив имеет рабочую полосу от нуля, то есть сигналы содержат постоянную составляющую, и до десятков герц. И, если говорить об измерении тока с целью выполнить схему токоограничения или защиты от короткого замыкания, то так оно и есть. Однако, частотная коррекция привода – совсем другое дело. В настоящей работерассматривается вопрос, как обойти указанное ограничение трансформатора.

На рисунке 1 показана упрощенная схема реализации местной обратной связи по току для коррекции следящего привода на базе двигателя постоянного тока (ДПТ), использующей токовый трансформатор в качестве датчика.

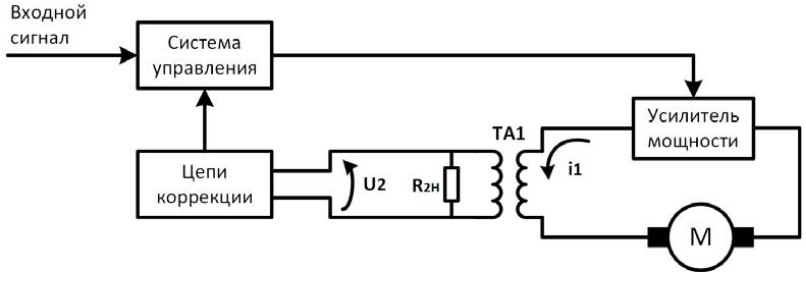


Рисунок 1 – Структурная схема следящего привода с местной обратной связью на трансформаторе тока (главная обратная связь не показана)

Можно показать, что в низкочастотной области АФЧХ токового трансформатора имеет вид, приведенный на рисунке 2

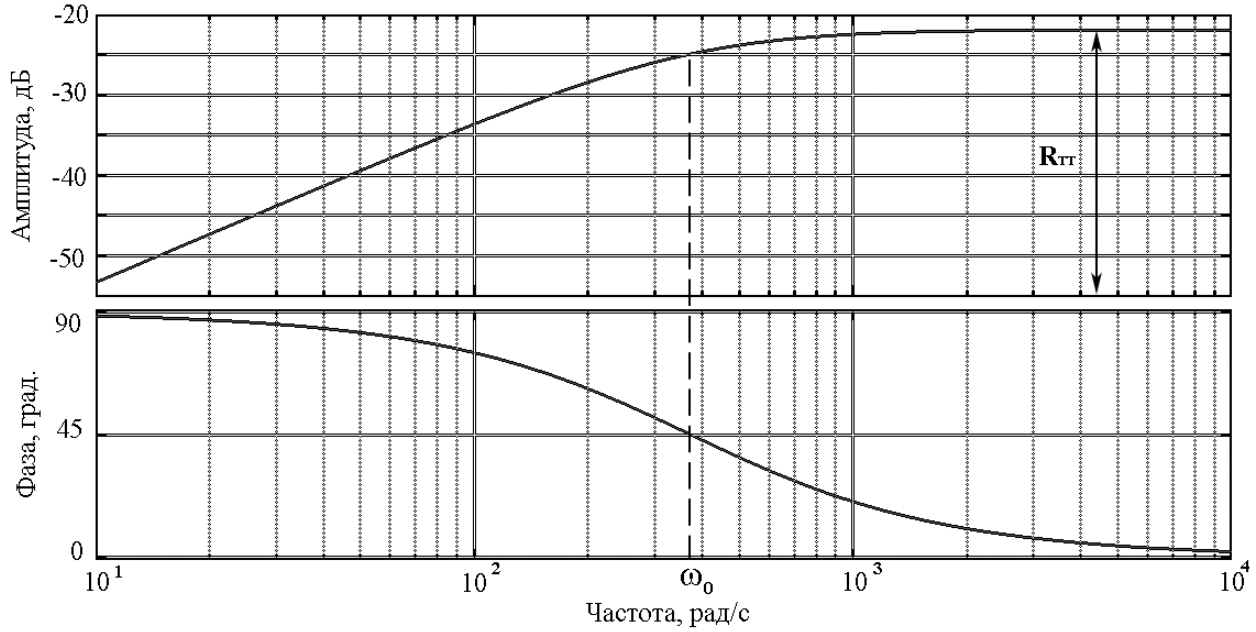


Рисунок 2 – Частотная характеристика токового трансформатора

Такая характеристика соответствует передаточной функции

$$W_{mm}(p) = \frac{R_{mm}p}{p + \omega_0}$$

$R_{\text{ТТ}}$ – коэффициент усиления на высоких частотах, имеющий размерность сопротивления;

ω_0 – частота среза трансформатора.

Трансформатор тока ведет себя как фильтр высоких частот первого порядка, дифференцируя сигнал в диапазоне низких частот (при $\omega \ll \omega_0$).

Используя трансформатор тока в качестве дифференцирующего устройства, можно организовать обратную связь по производной тока двигателя. Для этого необходимо, чтобы рабочая частота следящей системы ω_p была меньше частоты среза трансформатора ($\omega_p << \omega_0$). Полученная таким образом местная обратная связь работает во всей полосе пропускания системы, начиная с постоянного сигнала.

Заметим, что для выполнения схем токоограничения и защиты от короткого замыкания этот метод не подходит. Однако, эти две задачи обычно решаются схемотехнически в силовой части, не требуя гальванической изоляции. Заменяя ток его производной, получим более крутой срез частотной характеристики разомкнутой системы сразу после рабочей частоты. Вместо спада 40 дБ/дек будет наклон минус 60 дБ/дек. На рисунке 3 показан пример частотного синтеза следящей системы с использованием трансформатора тока.

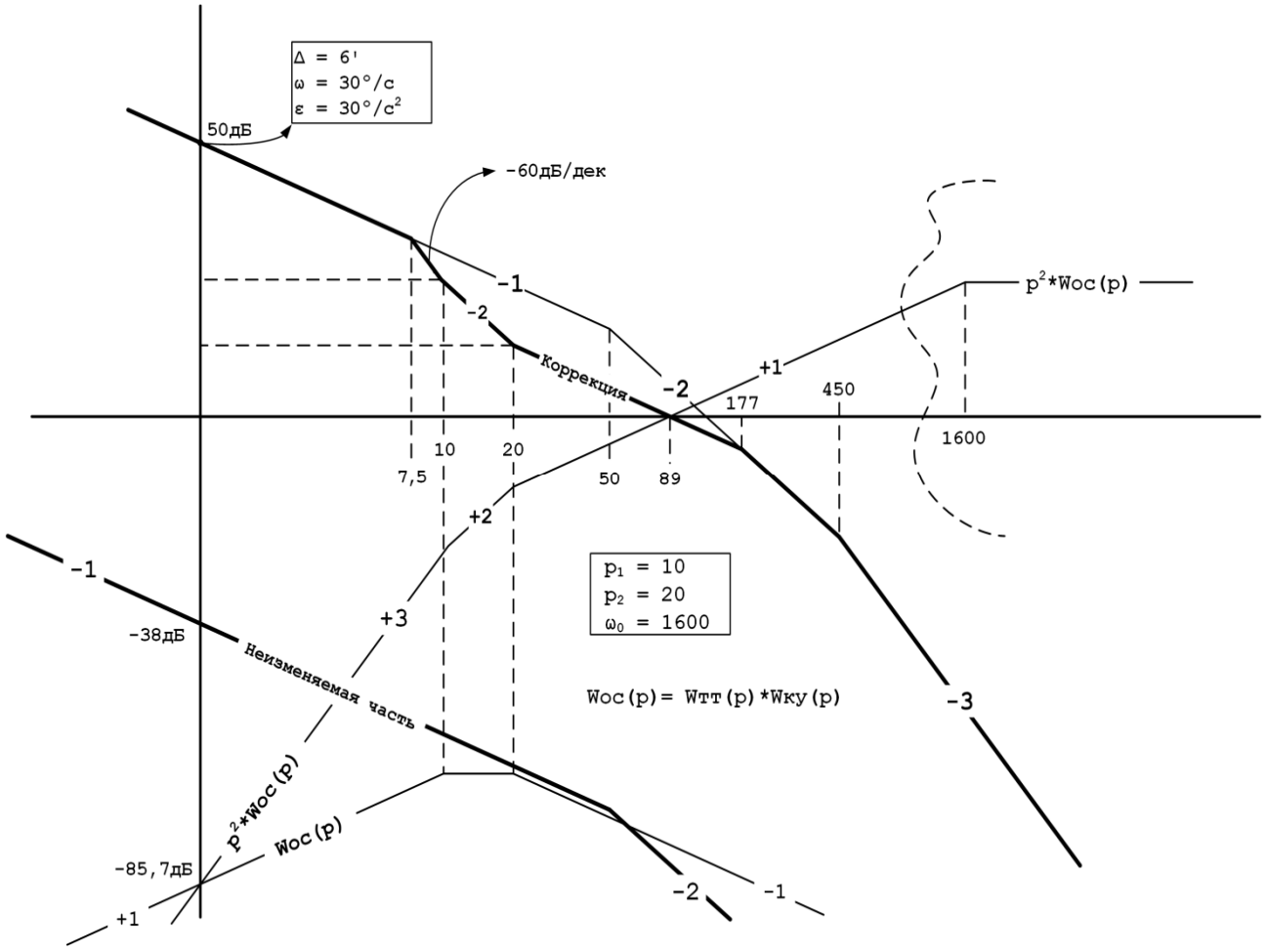


Рисунок 3 – Пример частотного синтеза следящей системы с трансформатором тока

Более быстрый спад желаемой характеристики приводит к необходимости усложнения корректирующих цепей. Их передаточная функция увеличивается на порядок по сравнению с прямой обратной связью по току из-за дополнительного полюса p_2. Без второго полюса замкнутая система была бы неустойчива. Оба полюса действительные, поэтому передаточная функция представляет собой апериодическое звено второго порядка и может быть реализована с помощью двух RC-цепей. Теоретически один из полюсов можно было бы получить как частоту среза трансформатора ω_0, но практически это потребует изготовления трансформатора чрезмерно больших размеров. На рисунке 3 показана система, в которой оба полюса $p_1 = 10$ и $p_2 = 20$ реализуются с помощью корректирующих цепей, а собственная частота среза трансформатора $\omega_0 = 1600$ находится далеко за значащими частотами системы и не оказывает влияния на ее функционирование.

Корректирующее устройство может быть реализовано как цифровым, так и аналоговым способом. В первом случае можно избежать RC-цепей с большими постоянными времени, однако перед АЦП потребуется реализовать предварительный фильтр, который эффективно подавит шумы на частотах выше половины частоты дискретизации сигнала. Если предварительный фильтр выбрать с небольшими постоянными времени, это приведет к большой полосе пропускания и потребует увеличения порядка фильтра, чтобы добиться равноценного подавления шума на той же частоте. Опыт показал, что само корректирующее устройство, реализованное в аналоговом виде, служит эффективным фильтром, подавляющим шумы перед дискретизацией. Это связано с тем, что АЧХ цепей обратной связи имеет вид полосового фильтра (рисунок 3) с максимумом в области средних частот, то есть в зоне коррекции, и, несмотря на малую скорость спада характеристики, подавление шума эффективно благодаря раннему началу спада. При этом конденсаторы корректирующих цепей имеют номинал в несколько микрофарад, что не создает больших проблем при реализации. Таким образом, при цифровом способе реализации системы управления коррекцию также выгоднее делать в аналоговом виде: проще выполнить цифро-аналоговое преобразование сигнала коррекции, чем непосредственно трансформатора тока.

Данныйспособ коррекции был применен при разработке аппаратуры управления следящего привода мощностью 1500 Вт на базе двигателя постоянного тока. В настоящее время опытный образец

изделия находится на завершающей стадии испытаний. При изготовлении токового трансформатора применялись исключительно отечественные компоненты, разрешенные к применению в военной технике: сердечник составлен из двух колец полукруглого сечения КП 44 х 28 х 10,3 из мо-пермаллоя марки П60производства ОАО «Ферроприбор» г. Санкт-Петербург; для обмоток использован провод ПЭТВ-2.

1. Блейз Е.С., Зимин А.В., Иванов Е.С. и др. Следящие приводы. В 3 т. 2-е изд., доп. и перераб. / Под ред. Чемоданова Б.К. Т.I: Теория и проектирование следящих приводов // М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. – 904 с.

ДЛЯ ЗАМЕТОК

NOTES

ДЛЯ ЗАМЕТОК

NOTES

Труды
Международной научно-технической конференции

ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ РОБОТОТЕХНИКА

24-25 ноября 2016 года, Санкт-Петербург

Proceedings
of the International Scientific and Technological Conference

EXTREME ROBOTICS

November 24-25, 2016, Saint-Petersburg, Russia

Подписано в печать 26.09.2016. Формат 60x84 1/8.
Печать – цифровая. Усл.-печ.л. 59,5
Тираж 200 экз. Бумага офсетная. Заказ №273

Отпечатано
в ООО «АП4Принт».