

МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

Том 22

2021

№ 11

Издаётся с 2000 года

ISSN 1684-6427 (Print)

ISSN 2619-1253 (Online)

DOI 10.17587/issn.1684-6427

Главный редактор:

ФИЛИМОНОВ Н. Б., д.т.н.

Заместители главного редактора:

БОЛЬШАКОВ А. А., д.т.н.

ПОДУРАЕВ Ю. В., д.т.н.

ЮЩЕНКО А. С., д.т.н.

Ответственный секретарь:

БЕЗМЕНОВА М. Ю.

Редакционный совет:

АНШАКОВ Г. П., чл.-корр. РАН

БОЛОТНИК Н. Н., чл.-корр. РАН

ВАСИЛЬЕВ С. Н., акад. РАН

ЖЕЛТОВ С. Ю., акад. РАН

КАЛЯЕВ И. А., акад. РАН

КУЗНЕЦОВ Н. А., акад. РАН

КУРЖАНСКИЙ А. Б., акад. РАН

ПЕШЕХОНОВ В. Г., акад. РАН

РЕЗЧИКОВ А. Ф., чл.-корр. РАН

СЕБРЯКОВ Г. Г., чл.-корр. РАН

СИГОВ А. С., акад. РАН

СОЙФЕР В. А., акад. РАН

СОЛОМЕНЦЕВ Ю. М., чл.-корр. РАН

ФЕДОРОВ И. Б., акад. РАН

ЧЕНЦОВ А. Г., чл.-корр. РАН

ЧЕРНОУСЬКО Ф. Л., акад. РАН

ЩЕРБАТЮК А. Ф., чл.-корр. РАН

ЮСУПОВ Р. М., чл.-корр. РАН

Редколлегия:

DORANTES D. J., PhD, Турция

GROUMPOS P. P., PhD, Греция

ISIDORI A., PhD, Италия

KATALINIC B., PhD, Австрия

LIN CH.-Y., PhD, Тайвань

MASON O. J., PhD, Ирландия

ORTEGA R. S., PhD, Франция

SKIBNIEWSKI M. J., PhD, США

STRZELECKI R. M., PhD, Польша

SUBUDHI B. D., PhD, Индия

АЛИЕВ Т. А., д.т.н., Азербайджан

ГАРАЩЕНКО Ф. Г., д.т.н., Украина

БОБЦОВ А. А., д.т.н.

БУКОВ В. Н., д.т.н.

ЕРМОЛОВ И. Л., д.т.н.

ЖУКОВ И. А., д.т.н.

ИЛЬЯСОВ Б. Г., д.т.н.

КОРОСТЕЛЕВ В. Ф., д.т.н.

ЛЕБЕДЕВ Г. Н., д.т.н.

ЛОХИН В. М., д.т.н.

МАГОМЕДОВ М. Х., д.ф.-м.н.

ПУТОВ В. В., д.т.н.

ПШИХОПОВ В. Х., д.т.н.

РАПОПОРТ Э. Я., д.т.н.

СЕРГЕЕВ С. Ф., д.пс.н.

ФИЛАРЕТОВ В. Ф., д.т.н.

ФРАДКОВ А. Л., д.т.н.

ФУРСОВ В. А., д.т.н.

Редакция:

БЕЗМЕНОВА М. Ю.

Директор издательства:

АНТОНОВ Б. И.

СОДЕРЖАНИЕ

РОБОТЫ, МЕХАТРОНИКА И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Серебрянный В. В., Бошляков А. А., Ющенко А. С. К юбилею кафедры "Робототехнические системы и мехатроника" МГТУ им. Н. Э. Баумана563

Ющенко А. С., Шуай Инь. Диалоговое управление коллаборативными роботами с помощью искусственных нейронных сетей567

Nazarova A. V., Jianwen Huo. Application of Distributed Robotic Systems in Earthquakes: Search, Planning and Control577

Серебрянный В. В., Бошляков А. А., Калиниченко С. В., Огородник А. И., Коновалов К. В. Шагающий робот для перемещения по вертикальным и произвольно ориентированным в пространстве поверхностям585

Носков В. П., Губернаторов Д. В. Экстремальная навигация по 3D-изображениям в мобильной робототехнике594

Самойлова А. С., Воронников С. А. Система управления шагающим роботом, адаптивным к изменению кинематической схемы601

Рубцов В. И., Машков К. Ю., Коновалов К. В. Многоуровневая система управления интеллектуальным роботом, входящим в состав группы610

Журнал входит в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата и доктора наук; журнал включен в систему Российского индекса научного цитирования, а также в МНБД Scopus и RSCI (на платформе Web of Science).

Информация о журнале доступна по сети Internet по адресу:
<http://novtex.ru/mech>, e-mail: mech@novtex.ru

MECHATRONICS, AUTOMATION, CONTROL

Vol. 22

2021

No. 11

MEKHATRONIKA, AVTOMATIZATSIYA, UPRAVLENIE

Published since 2000

ISSN 1684-6427 (Print) ISSN 2619-1253 (Online)

DOI 10.17587/issn.1684-6427

Editor-in-Chief

FILIMONOV N. B.

Deputy Editors-in-Chief:

BOLSHAKOV A. A.

PODURAEV Yu. V.

YUSCHENKO A. S.

Responsible Secretary:

BEZMENOVA M. Yu.

Editorial Board:

ANSHAKOV G. P.

BOLOTNIK N. N.

CHENTSOV A. G.

CHERNOUSKO F. L.

FEDOROV I. B.

KALYAEV I. A.

KURZHANSKI A. B.

KUZNETSOV N. A.

PESHEKHONOV V. G.

REZCHIKOV A. F.

SCHERBATYUK A. F.

SEBRYAKOV G. G.

SIGOV A. S.

SOJFER V. A.

SOLOMENTSEV Yu. M.

VASSILYEV S. N.

YUSUPOV R. M.

ZHELTOV S. Yu.

Editorial Council:

ALIEV T. A., Azerbaijan

DORANTES D. J., PhD, Turkey

GARASCHENKO F. G., Ukraine

GROUMPOS P. P., PhD, Greece

ISIDORI A., PhD, Italy

KATALINIC B., PhD, Austria

LIN CH.-Y., PhD, Taiwan

MASON O. J., PhD, Ireland

ORTEGA R. S., PhD, France

SKIBNIEWSKI M. J., PhD, USA

STRZELECKI R. M., PhD, Poland

SUBUDHI B. D., PhD, India

BOBTSOV A. A.

BUKOV V. N.

ERMOLOV I. L.

FILARETOV V. F.

FRADKOV V. L.

FURSOV V. A.

ILYASOV B. G.

KOROSTELEV V. F.

LEBEDEV G. N.

LOKHIN V.M.

MAGOMEDOV M. Kh.

PUTOV V. V.

PSHIKHOPOV V. Kh.

RAPOPORT E. Ya.

SERGEYEV S. F.

ZHUKOV I. A.

Editorial Staff:

BEZMENOVA M. Yu.

Director of the Publishing House:

ANTONOV B. I.

The mission of the Journal is to cover the current state, trends and perspectives development of *mechatronics*, that is the priority field in the technosphere as it combines mechanics, electronics, automatics and informatics in order to improve manufacturing processes and to develop new generations of equipment. Covers topical issues of development, creation, implementation and operation of mechatronic systems and technologies in the production sector, power economy and in transport.

CONTENTS

ROBOT, MECHATRONICS AND ROBOTIC SYSTEMS

- Serebrennyj V. V., Boshlyakov A. A., Yuschenko S. A.** To the Anniversary of the Department of "Robotic Systems and Mechatronics" of the Bauman Moscow State Technical University 563
- Yuschenko A. S., Shuai Yin.** Dialogue Control of Collaborative Robots Based on Artificial Neural Networks 567
- Nazarova A. V., Jianwen Huo.** Application of Distributed Robotic Systems in Earthquakes: Search, Planning and Control 577
- Serebrennyj V. V., Boshlyakov A. A., Kalinichenko S. V., Ogorodnik A. I., Konovalov K. V.** Walking Robot for Moving on Vertical and Arbitrarily Oriented Surfaces 585
- Noskov V. P., Gubernatorov D. V.** Extreme 3D Image Navigation in Mobile Robotics 594
- Samoylova A. S., Vorotnikov S. A.** The Walking Robot Control System that is Adaptive to Changes in the Kinematics 601
- Rubtsov V. I., Mashkov K. J., Konovalov K. V.** Multi-Level Control System for an Intelligent Robot that is Part of a Group 610

Information about the journal is available online at:
<http://novtex.ru/mech.html>, e-mail: mech@novtex.ru

В. В. Серебрянный, канд. техн. наук, доц., vsereb@bmstu.ru,

А. А. Бошляков, канд. техн. наук, доц., boshlyakov@bmstu.ru,

А. С. Юценко, д-р техн. наук, проф., arkadyus@mail.ru,

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)

К юбилею кафедры "Робототехнические системы и мехатроника" МГТУ им. Н. Э. Баумана

В этом году исполняется 70 лет со дня создания в МГТУ им. Н. Э. Баумана новой кафедры, которая сегодня называется "Робототехнические системы и мехатроника". Эволюция развития этой кафедры отражает в полной мере развитие технического направления, которое она представляет, от систем управления автоматическими приводами до автономных роботов. При этом, совершенствуя программы подготовки в соответствии с требованиями времени, удалось сохранить традиции российской инженерной школы, в основе которых лежит фундаментальная естественно-научная подготовка в сочетании с практическими навыками создания новых технических средств. Крупные ученые и инженеры внесли свой вклад в содержание и методику подготовки специалистов в области робототехники и мехатроники, заложили основы этой подготовки, которая и сегодня востребована как в России, так и за рубежом. Наступили времена, когда робототехника из направления, перспективного в далеком будущем, превратилась в насущную потребность. Сегодня кафедра "Робототехнические системы и мехатроника" в полной мере отвечает новым вызовам времени.

Ключевые слова: автоматический привод, мехатроника, робототехника, мобильные роботы, робототехнические системы, манипуляторы

Кафедра "Робототехнические системы и мехатроника" МГТУ им. Н. Э. Баумана была создана в Университете (в те времена — в Московском высшем техническом училище им. Н. Э. Баумана) в далеком 1951 г. В эти годы в обстановке холодной войны одной из задач стало обновление систем вооружения, разработка средств их автоматизации. Задача подготовки специалистов в этой области и была поставлена перед новой кафедрой, которая вначале называлась "Силовой следящий привод объектов вооружения", позже "Автоматические приводы". Такие приводы широко применялись для управления радиолокационными станциями, артиллерийскими орудиями, в танковых стабилизаторах, корабельных установках. Первым заведующим кафедрой был крупный ученый в области гидравлики и гидравлических передач, Заслуженный деятель науки и техники РСФСР, доктор технических наук профессор Владимир Николаевич Прокофьев. С 1956 по 1961 гг. кафедрой руководил профессор, трижды Лауреат Государственных премий СССР Николай Маркович Якименко, основоположник научной школы проектирования электрических следящих приводов и систем автоматического управления комплексами объектов

вооружения и другой специальной техники. В последующий период 1961 по 1967 гг. кафедре возглавлял профессор Борис Дмитриевич Садовский, один из основателей научной школы проектирования электрогидравлических следящих приводов, которыми в послевоенные годы оснащались все новые корабли военно-морского флота. Значительный вклад в теорию следящего электропривода внес следующий заведующий кафедрой, который возглавлял ее с 1967 по 1971 гг., — Борис Константинович Чемоданов, доктор технических наук профессор, генеральный конструктор научно-производственного объединения "Астрофизика". Под его редакцией был выпущен трехтомник "Математические основы теории автоматического регулирования", который выдержал три издания [1], а также двухтомная монография по теории следящего привода.

Новый период в жизни кафедры начался в 1971 г., когда на кафедру пришел Евгений Павлович Попов, академик РАН, Лауреат Государственных премий, выдающийся ученый в области теории автоматического управления, создатель основ прикладной теории и методов расчета нелинейных автоматических систем. Кафедра к тому времени уже называлась

"Автоматические системы и робототехника" (СМ-7).

Новая тенденция в автоматике, которая начала складываться в это время, заключалась в полной автоматизации систем как промышленного, так и специального назначения за счет внедрения робототехники. Работы в этом направлении на кафедре ранее были начаты доктором технических наук профессором Н. А. Лакотой и доктором технических наук профессором В. С. Кулешовым применительно к копирующим манипуляторам [2] для выполнения работ в атомной промышленности. В дальнейшем накопленный здесь опыт оказался очень востребованным при ликвидации аварии на Чернобыльской АЭС — в этих работах приняли участие и сотрудники кафедры.

По инициативе Е. П. Попова и при поддержке академиков РАН Д. Е. Охоцимского и



Академик РАН Е. П. Попов



Д-р техн. наук профессор Н. А. Лакота

И. М. Макарова в 1981 г. Академией наук и Министерством высшего образования СССР был создан Научно-учебный центр "Робототехника" МГТУ им. Н. Э. Баумана, научным руководителем которого стал Е. П. Попов. На базе Центра была создана новая кафедра "Робототехнические системы" (РК-10), заведующим которой в 1984 г. также стал Е. П. Попов. Кроме того, был организован и новый факультет "Робототехнические системы и комплексы". Сотрудниками новой кафедры становились, в основном, преподаватели и инженеры прежней кафедры, оставшейся на факультете "Специальное машиностроение", которая теперь называлась "Специальная робототехника и мехатроника". Обе кафедры продолжали свою работу в тесном сотрудничестве, но по различным направлениям робототехники. Кафедра РК-10 приступила к подготовке специалистов в области промышленной робототехники, систем управления автономными роботами с элементами искусственного интеллекта, а также в области разработки многоагентных робототехнических систем. Под руководством академика Е. П. Попова на последовательно руководимых им кафедрах СМ-7 и РК-10 в МГТУ им. Н. Э. Баумана была создана ведущая научная школа робототехники в нашей стране. Эта школа получила широкую известность и за пределами России. За эти годы дальнейшее развитие получила теория робототехнических систем. Под редакцией Е. П. Попова были изданы монографии по теоретической робототехнике [3, 4], серия инженерных монографий "Проектирование следящих систем", несколько позже были изданы монографии по теории манипуляционных роботов [5] и по информационным устройствам робототехнических систем [6]. После ухода из жизни Е. П. Попова в 1999 г. и вплоть до 2014 г. кафедрой РК-10 руководил доктор технических наук профессор, также выпускник кафедры СМ-7 Аркадий Семенович Ющенко.

Кафедра СМ-7 продолжала готовить специалистов и вести научные разработки в области мехатроники и робототехники специального назначения, включая мобильную робототехнику наземного и космического базирования. С 1984 по 2000 гг. кафедрой руководил Николай Андреевич Лакота, доктор технических наук профессор, организатор научных исследований, директор Научно-исследовательского института проблем машиностроения при МВТУ (МГТУ) им. Н. Э. Баумана. По его инициативе научные разработки кафедры широко применялись при создании реальных образцов роботов для экстремальных сред. В это направление внес боль-

шой вклад доктор технических наук профессор Владимир Сергеевич Кулешов. В дальнейшем им была создана кафедра промышленной робототехники в Московском станкоинструментальном институте (МГТУ СТАНКИН). В настоящее время ее возглавляет выпускник МГТУ им. Н. Э. Баумана доктор технических наук профессор Юрий Викторович Подураев.

После ухода из жизни Н. А. Лакоты кафедру СМ-7 последовательно возглавляли: Владимир Сергеевич Кулешов (2000—2001), Юрий Иванович Рассадкин (2001—2009) и Иван Васильевич Рубцов (2009—2014). В эти годы на кафедре была создана научная школа проектирования систем управления мобильных и манипуляционных роботов, велись работы по созданию мобильных робототехнических комплексов специального назначения, микропроцессорных систем управления и обработки информации.

В 2014 г. Ректоратом МГТУ им. Н. Э. Баумана было принято решение об объединении кафедр "Робототехнические системы" и "Специальная робототехника и мехатроника" и создании на их базе новой кафедры, которая сохранила индекс СМ-7, но вновь изменила название на "Робототехнические системы и мехатроника". Новую кафедру возглавил Алексей Григорьевич Лесков, доктор технических наук профессор, директор Дмитровского филиала МГТУ им. Н. Э. Баумана.

В филиале им была создана лаборатория робототехники, основным направлением научной работы которой стало исследование манипуляционных роботов космического базирования. Был создан функционально-моделирующий стенд космических манипуляционных роботов (КМР) для подготовки операторов КМР и наземной отладки роботизированных операций в космосе. Аналогичный комплекс был реализован сотрудниками лаборатории в Центре подготовки космонавтов им. Ю. А. Гагарина.

В 2017 г. кафедру возглавил кандидат технических наук доцент Владимир Валерьевич Серебрянный, специалист в области промышленной робототехники, организатор производства. Под его руководством на предприятии "Волжский машиностроительный завод" было спроектировано и запущено в производство семейство отечественных промышленных роботов, реализован ряд промышленных проектов в области промышленной робототехники.

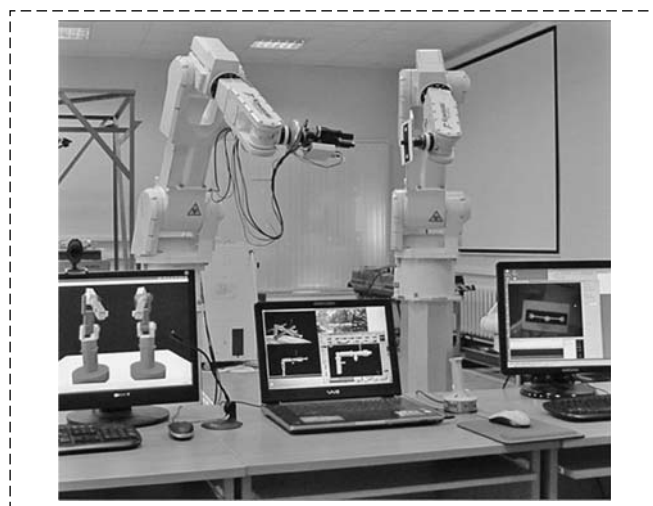
Благодаря его инициативе на кафедре существенно обновилось робототехническое оборудование. Лаборатория кафедры была оснащена новейшими образцами промышленных манипуляционных роботов фирм KUKA, ABB и FANUC, активно внедряемыми в настоящее

время в учебный процесс. Для студенческих работ были приобретены и сегодня активно используются в учебном процессе мобильные платформы различного типа, используемые при изучении так называемых многоагентных робототехнических систем. Это направление сегодня является одним из основных направлений научной работы на кафедре. Другим современным направлением является изучение и разработка систем дистанционного управления роботами с применением технологии виртуальной и дополненной реальности. Оборудование для развития этого направления было приобретено при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, по программам которого велись исследования в прошедшие годы.

Кафедра "Робототехнические системы и мехатроника" имеет тесные учебные и научные связи с техническими вузами Китая, Франции, Германии, а также "ближнего зарубежья", в том числе Армении, Казахстана, что позволяет направлять студентов и аспирантов в эти вузы для обучения, стажировки и для совместного проведения научных исследований.



Мобильный робот



Функционально-моделирующий стенд

В настоящее время кафедра ежегодно выпускает около 100 бакалавров и 50 магистров. С 2022 г. планируется возрождение обучения инженеров-робототехников в связи с тем, что потребность работодателей в специалистах, способных разрабатывать новые робототехнические системы, постоянно возрастает.

Выпускники кафедры работают в ведущих государственных центрах оборонной и космической техники, на промышленных предприятиях, внедряющих робототехнику, а также частных компаниях, обеспечивающих автоматизацию производства. Постоянная модернизация учебных программ, включение в учебный процесс новых дисциплин, внедрение передовых образовательных технологий позволяет сохранять уровень востребованности наших выпускников, адаптироваться к современным

вызовам, поддерживать высокую планку профессиональных компетенций в сфере робототехники и мехатроники.

Список литературы

1. Иванов В. А., Медведев В. С., Чемоданов Б. К., Ющенко А. С. Математические основы теории автоматического управления / Под ред. Б. К. Чемоданова. В 3-х тт. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009.
2. Кулешов В. С., Лакота Н. А. Динамика систем управления манипуляторами. М.: Энергия, 1971.
3. Попов Е. П., Верещагин А. Ф., Зенкевич С. Л. Манипуляционные роботы. Динамика и алгоритмы. М.: Наука, 1978.
4. Медведев В. С., Лесков А. Г., Ющенко А. С. Системы управления манипуляционных роботов. М.: Наука, 1978.
5. Зенкевич С. Л., Ющенко А. С. Основы управления манипуляционными роботами. М.: Изд. МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004.
6. Воротников С. А. Информационные устройства робототехнических систем. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005.

To the Anniversary of the Department of "Robotic Systems and Mechatronics" of the Bauman Moscow State Technical University

V. V. Serebrennyj, Ph.D., Associate Professor, vsereb@bmstu.ru,
A. A. Boshlyakov, Ph.D., Associate Professor, boshlyakov@bmstu.ru,
A. S. Yuschenko, Dr. of Science, Professor, arkadyus@mail.ru,

Bauman Moscow State Technical University, Department of Robotic Systems and Mechatronics,
Moscow, 105005, Russian Federation

Corresponding author: Yuschenko Arkady S., Dr. of Science, Professor, Bauman Moscow State Technical University, Department of Robotic Systems and Mechatronics, Moscow, 105005, Russian Federation, e-mail: arkadyus@mail.ru,

Accepted on July 27, 2021

Abstract

This year we celebrate the 70-th year of the chair founded in BMSTU in 1951 which name to-day is "Robotic Systems and Mechatronics". Evolution of the chair during the last 70 years is completely reflected the technical progress in the field of automation. From automatic drives to autonomous robots. Again with the improvement of the educational programs in accordance with the vital demands the chair managed to keep the basic traditions of the Russian engineering school based on the combination of the fundamental scientific background with the practical competence in the new technical systems design. The prominent scientists and engineers made a major contribution to the content and methods of training of future specialists in robotics and mechatronics which are acknowledged both in Russia and abroad. Nowadays robotics is transforming from perspective direction to urgent needs. The chair "Robotic Systems and Mechatronics" is completely ready to reply the new challenge of time.

Keywords: automatic drive, mechatronics, robotics, mobile robots, robotic systems, manipulators

For citation:

Serebrennyj V. V., Boshlyakov A. A., Yuschenko S. A. To the Anniversary of the Department of "Robotic Systems and Mechatronics" of the Bauman Moscow State Technical University, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2021, vol. 22, no. 11, pp. 563—566.

DOI: 10.17587/mau.22.563-566

References

1. Ivanov V. A., Medvedev V. S., Suitcases B. K., Yushchenko A. S. Mathematical Basic of the Automatic Control Theory, Moscow, Publishing house of the BMSTU, 2009 (in Russian).
2. Kulshov V. S., Lakota N. A. Dynamics of the manipulator control system, Moscow, Energia, 1971 (in Russian).
3. Popov E. P., Vereschagin A. F., Zenkevich S. L. Manipulation robots. Dynamics and algorithms, Moscow, Nauka, 1978 (in Russian).
4. Medvedev V. S., Leskov A. G., Yuschenko A. S. Control systems of manipulation robots. Системы управления манипуляционных роботов, Moscow, Nauka, 1978 (in Russian).
5. Zenkevich S. L., Yuschenko A. S. Basic of manipulation robots control, Moscow, Publishing house of the BMSTU, 2004 (in Russian).
6. Vorotnikov S. A. Information devices of robotic systems Информационные устройства робототехнических систем, Moscow, Publishing house of the BMSTU, 2005 (in Russian).

А. С. Ющенко, д-р техн. наук, проф., arkadyus@mail.ru, **Шуай Инь**, аспирант, shuai.yin@yandex.ru,
Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)

Диалоговое управление коллаборативными роботами с помощью искусственных нейронных сетей

Рассмотрен коллаборативный робот как мобильное робототехническое устройство, способное по речевой команде человека выполнять те или иные действия, причем не обязательно в том же рабочем пространстве, в котором находится сам оператор. При этом предполагается двусторонний диалог человека и робота в целях уточнения задачи, ситуации, состояния робота и, возможно, самого оператора.

Комплексная задача управления, а скорее, задача взаимодействия человека с таким искусственным партнером потребовала применения новых средств управления, распознавания ситуации, ведения речевого диалога. В качестве средств, позволяющих не только решить весь комплекс задач, но и провести предварительное обучение робота, в этой работе выбрана комбинация нейронных сетей различного типа — конволюционных для распознавания образов, глубоких сетей для распознавания речи, нейросетей LSTM для автономного управления движением робота по наблюдаемой ситуации.

Работы в области управления мобильными и манипуляционными роботами, в том числе с участием человека, в течении ряда лет проводились на кафедре "Робототехнические системы и мехатроника" МГТУ им. Н. Э. Баумана, отмечающей свое семидесятилетие. Читатель может познакомиться с этими работами по библиографическому списку. По существу, результатом всех этих работ является законченная модель сервисного манипуляционного робота, которая может найти самое широкое применение.

Ключевые слова: мобильный коллаборативный робот, нейронная сеть, диалоговое управление, конволюционная сеть LSTM, планирование траектории, управление движением, распознавание образов, SLAM

Введение

Коллаборативная робототехника все активнее входит в нашу жизнь. Основными ее особенностями является возможность безопасного взаимодействия робота с человеком в общем рабочем пространстве и возможность такого взаимодействия без специальной подготовки в области робототехники. Примерами таких систем могут быть коллаборативные робототехнические системы (КРТС), используемые в медицине для помощи хирургу при выполнении хирургических операций, для реабилитации людей с ограниченными возможностями, для помощи инвалидам, для оказания поддержки в работе космонавтов, в военном деле и т. п. В настоящее время получили практическое применение коллаборативные манипуляторы, которые работают в общем рабочем пространстве с оператором и безопасны для него. Но коллаборативными могут быть и мобильные роботы (КМР), которые перемещаются в сложном пространстве, в котором могут находиться препятствия и другие участники движения, в том числе люди. В более общем случае КМР включает в себя и подвижную платформу и манипуляторы, что позволяет реализовать принципиально более широкий

круг задач, например, человек может попросить робота принести нужный предмет или выполнить несложную операцию. Будем предполагать также, что КМР обладает диалоговым интерфейсом, обеспечивающим человеку возможность двустороннего речевого диалога в рамках ограниченного профессионально-ориентированного языка, близкого по своему синтаксису к естественному. Теперь КМР становится полноправным партнером человека.

Решение такой задачи, определяющей новый шаг в разработке КРТС, требует применения нового аппарата, который в равной мере был бы применим для решения всего комплекса возникающих задач, включая распознавание речи и организацию диалога, распознавание образов по речевому маркеру, выполнение манипуляционных операций, наконец, перемещение в ограниченном пространстве с не определенными заранее препятствиями, в том числе движущимися. Универсальным средством решения всего комплекса задач сегодня являются обучаемые нейронные сети различного типа и их комбинированное применение при решении поставленных перед КРТС задач.

Задача управления КРТС манипуляционного типа рассматривалась в ряде работ, в том числе выполненных в МГТУ им. Н. Э. Баума-

на, и опубликованных ранее. Ниже мы кратко остановимся на полученных результатах и уделим основное внимание задаче диалогового управления мобильными роботами с использованием нейронных сетей, которая представляется актуальной при организации диалогового управления КМР широкого назначения.

Диалоговое управление коллаборативным мобильным роботом

Мобильные роботы, дистанционно управляемые человеком, находят широкое применение в задачах инспекции территорий и помещений, при спасении людей после аварий и катастроф, при реабилитации людей с ограниченными возможностями к передвижению и т. д. Во многих случаях управление такими роботами происходит дистанционно, в непрерывном режиме контроля и управления с помощью средств визуализации и компьютерной поддержки действий оператора. Эволюция таких систем заключается в постепенной автоматизации процесса управления, в результате которой создаются системы управления, в которых человек только ставит задачу роботу. При этом робот должен самостоятельно решать такие задачи, как определение собственного положения в пространстве, маневрирование при появлении новых, в том числе движущихся, объектов. Если перемещение робота происходит в не полностью определенной обстановке, то всегда могут возникнуть проблемы, решение которых не было заранее предусмотрено. Поэтому в таких случаях целесообразен диалог с человеком-оператором, который поставил задачу и контролирует ее выполнение роботом.

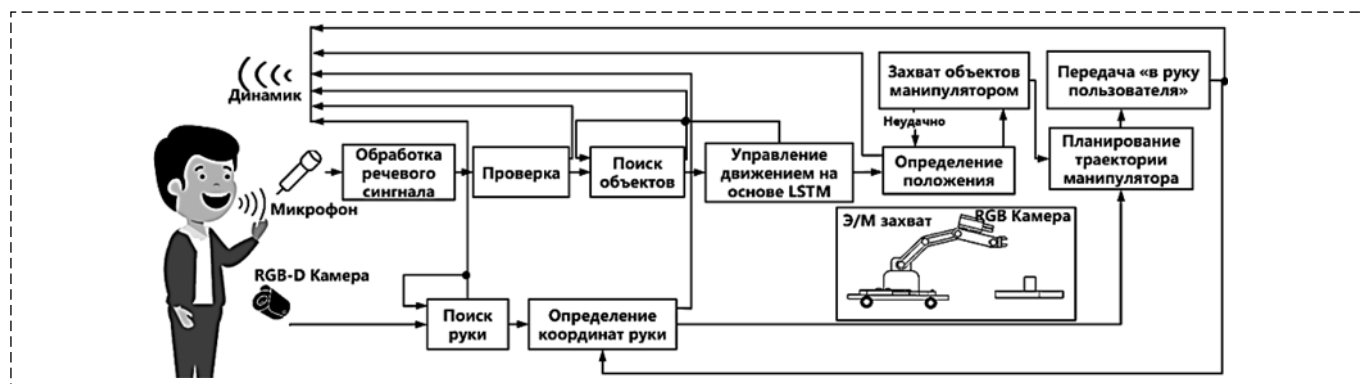
Учитывая, что речь идет о коллаборативных системах, мы не предполагаем никаких специальных знаний пользователя в области робототехники. Диалог должен вестись в рамках профессионально-ориентированного языка, доступного пользователю и близкого к естественному. Заметим, что такой подход, названный ранее диалоговым управлением [1, 2], подразумевает визуальное распознавание роботом окружающей обстановки, объектов, препятствий и сообщение об обстановке пользователю на том же языке. Таким образом, робот должен быть оснащен системой распознавания не только речи, но и визуальных образов, а также системой планирования маршрута движения.

Уточним, что мы понимаем под термином "коллаборативный мобильный робот". Это робот, в общем случае действующий в условиях частично определенной среды, модель которой может быть предварительно построена тем же роботом с использованием технологии SLAM (Self Localization and Mapping) при участии оператора форме диалога. Робот выполняет команды оператора, определяющие цель движения в данной среде, самостоятельно решая задачи планирования маршрута, обхода неожиданных препятствий, в том числе динамических, обращаясь к оператору с вопросами в тех случаях, когда решение не определено или неоднозначно. Робот снабжен манипулятором, позволяющим выполнить задание оператора во внешнем мире.

Отличие КМР от КРТС в прежнем понимании заключается в том, что робот и оператор функционируют в разных пространствах. Однако при этом вовсе не исключается взаимодействие с другим человеком-партнером, которому, например, надо что-то передать. Остается задача распознавания объектов внешней среды, в которой робот должен "узнавать" и своего "хозяина" и "партнера", а также относить к посторонним объектам других людей, которые могут встретиться в процессе движения и которых нужно обходить.

Вопросы организации диалогового управления коллаборативными манипуляционными роботами рассматривались нами при разработке робота-ассистента хирурга [3–5]. Ряд проблем, связанных с реализацией диалогового управления мобильными роботами, могут быть решены в данном случае идентично. Это относится к системе распознавания речи и организации диалога, к подсистеме поиска и распознавания объектов с помощью системы компьютерного зрения, наконец, к системе распознавания положения самого оператора, поскольку во многих случаях речь идет об обслуживании пользователя. Эти блоки функциональной схемы системы управления КМР показаны на рис. 1. В случае мобильных роботов задача существенно усложняется тем, что робот должен также решать задачу SLAM, т. е. самостоятельно строить "карту" местности, определять собственную локализацию на этой карте и выполнять поставленную оператором задачу в построенной модели среды.

При традиционном подходе к управлению автономными мобильными роботами решение



этой задачи разбивается на три этапа: построение карты местности при автономной навигации, планирование движения и реализация движения с помощью системы управления робота [1]. Такой подход требует много времени, что в ряде случаев неприемлемо. В связи с этим в данной работе предлагается применить революционную сеть LSTM (Long Short-Term Memory), позволяющую решать задачу управления непосредственно по текущим наблюдениям и по заданной цели движения, подобно тому, как это делает человек. При этом управление роботом может сопровождаться диалогом с пользователем с целью уточнить наблюдаемые объекты и цели движения, выбрать наилучший из возможных маршрутов движения при появлении препятствий. После выбора маршрута система должна самостоятельно генерировать сигналы управления угловой и линейной скоростями робота в соответствии с задачей, имеющимися ограничениями и текущими наблюдениями. Комплексирование задач, которые приходится решать последовательно при традиционном походе к управлению, позволяет существенно снизить требуемые для этого вычисления и обеспечить решение задачи диалогового управления в реальном масштабе времени.

3D-карты и определения собственного положения робота он должен быть, в общем случае, оснащен RGB-D-камерой или иным аналогичным устройством, обладающим возможностью кругового обзора окружающей среды. Сеть LSTM должна непосредственно управлять движением робота по наблюдаемому образу ситуации. Иными словами, входной сигнал сети LSTM представляет собой RGB- или RGB-D-образ ситуации с указанием текущего положения робота и цели, а выходные сигналы — это сигналы управления линейной и угловой скоростями платформы мобильного робота.

В соответствии со схемой на рис. 1 первая задача, которая должна быть решена при диалоговом управлении, это собственно реализация речевого диалога между человеком и роботом. Структура системы диалогового управления включает четыре блока: распознавание естественной речи, "понимание" речи, преобразование текстовой информации в инструкции мобильному роботу, речевая обратная связь с информацией о ситуации и получение разрешений на выбранные действия (рис. 2).

Акустическая модель предназначена для распознавания не только отдельных слов, но и от-

дельных фраз, предложений. Для ее реализации целесообразно применять глубокие нейронные сети (Deep Neural Network, DNN), которые содержат не менее пяти скрытых слоев. Однако нейронные сети не способны непосредственно моделировать голосовые сигналы. Поэтому, чтобы использовать способность нейронных сетей к классификации, целесообразно рассмотреть комбинированную акустическую модель, которая состоит из глубоких нейронных сетей DNN и скрытой марковской модели HMM (Hidden Markov Network). Последняя используется для описания динамики голосовых сигналов. Обучение нейронной сети проводится с помощью алгоритма обратного распространения ошибки. Акустическая модель с использованием модели DNN-HMM способна распознавать естественную речь в реальном масштабе времени, что особенно важно при разработке робототехнической системы коллаборативного типа.

Речевая модель в структуре, показанной на рис. 3, служит средством распознавания речи. Для решения этой задачи целесообразно выбрать речевую модель n -gram, которая позволяет вычислять вероятность следующего слова по словам, которые появились раньше. Иными словами, речевая модель n -gram способна про-

гнозировать состояние по предыдущим n состояниям.

Полученная из акустического блока текстовая информация поступает в блок **"понимания" естественной речи** (см. рис. 2), задача которого состоит в том, чтобы определить поставленную роботу задачу по ключевым словам. Так, если обнаружены глаголы "захватить", "взять", то определяется задача захвата. При этом заранее определяется условие, что эта задача может быть выполнена, только если объект находится в рабочей зоне манипулятора. В противном случае определяется задача движения к объекту. Если обнаружены глаголы "двигаться", "обходить" и т. п., то определяется задача движения. В общем случае задача описывается фреймом, который можно представить в следующем виде: <объект управления> <имя операции> <сопутствующие объекты> <условия выполнимости операции>. Объектом управления по умолчанию является сам мобильный робот, возможности и ограничения которого имеются в базе данных. Эти возможности определяют условия выполнимости операции с учетом текущей ситуации и свойств рабочей среды. В случае отсутствия необходимой информации робот запрашивает об этом оператора. Заметим, что при этом могут

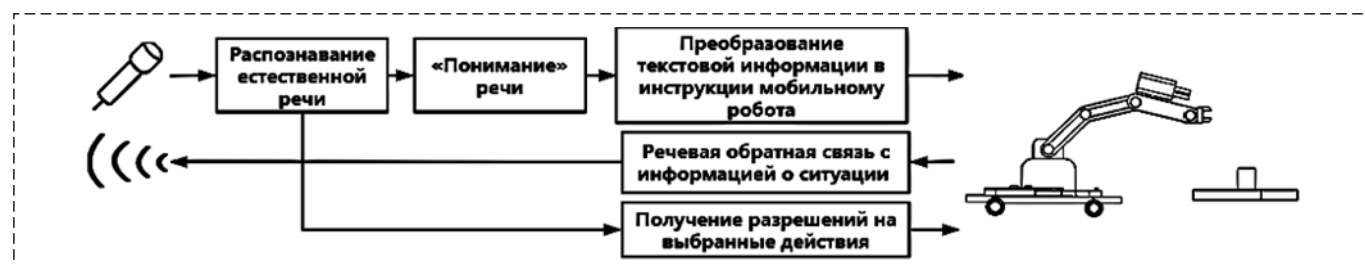


Рис.2. Структура системы диалогового управления КМР

Fig. 2. The structure of the dialogue management system of the CMR

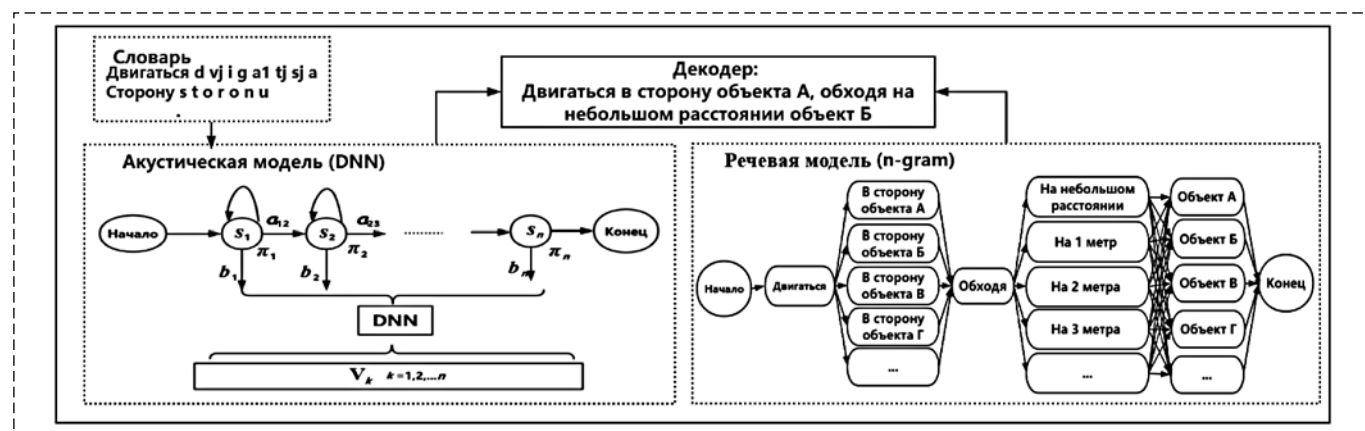


Рис. 3. Структура системы распознавания естественной речи с использованием глубоких нейронных сетей

Fig. 3. The structure of a natural speech recognition system using deep neural networks

быть использованы лингвистические переменные [5]. Условия выполнимости операции могут включать в себя и проверку постусловий, которые должны быть выполнены после завершения операции. Таким образом, в результате работы системы "понимания" речи заполняются слоты фрейма операции, которые, в свою очередь, преобразуются в команды управления роботом. Если оператор не определил те или иные слоты, формируется речевой запрос оператору для уточнения задачи.

Интерфейс оператора должен содержать ряд сценариев диалога, которые используются в зависимости от задачи робота и текущей ситуации. Это может быть запрос о состоянии внешней (по отношению к роботу) среды, включая новые препятствия, или о состоянии робота, полученных повреждениях, запасе энергопитания и т. п. Отметим, что для реализации управления диалогом может быть успешно применен подход, основанный на использовании модифицированной сети Петри [6].

Решение задач локализации, картографирования и генерации траекторий мобильного робота

Задача, условно называемая картографированием (mapping), представляет собой преобразование показаний датчиков робота в трехмерный образ окружающей среды. В большинстве случаев задачи картографирования и позиционирования, т. е. определения текущего положения робота, решаются одновременно.

Связь между наблюдаемыми координатами точек на двумерном изображении и соответствующими трехмерными координатами в абсолютной системе координат выражается формулой

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{z} \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Здесь u, v — координаты точки (пикселя) на двумерном изображении; f_x, f_y, c_x, c_y — внутренние параметры камеры; $r_{11}, \dots, r_{33}$ — параметры однородной матрицы, определяющие поворот камеры относительно сцены; t_x, t_y, t_z — параметры, определяющие поступательное перемещение; наконец, x, y, z — это координаты соответствующей точки в инерциальной системе координат.

Заметим, что последовательность параметров, определяющих вращение и поступательное перемещение датчиков, установленных на роботе, в процессе его движения определяет процедуру так называемой визуальной одометрии [7]. С помощью визуальной одометрии удастся решить и ряд других задач управления КМР, например, задачу возвращения робота к своему "хозяину" при потере связи [8]. Существуют и другие методы одометрии, в том числе методы, комбинирующие информацию от двигателей, гироскопов и других сенсоров [9], методы визуальной одометрии, основанные на выделении характерных точек на изображении внешних объектов [10]. Поскольку задача построения карты обстановки достаточно хорошо известна, мы не будем на ней останавливаться более подробно, тем более что во многих случаях, в том числе при работе в известном помещении, эта карта известна априори.

На построенной карте может быть отмечено собственное положение робота, которое определяется с помощью собственной сенсорной системы, и цель движения, заданная оператором и формализованная системой распознавания речи. Теперь задача состоит в построении маршрута движения с минимальной функцией "стоимости", в качестве которой обычно используется длина траектории. При традиционном планировании обычно используются сплайны третьего порядка, позволяющие управлять скоростью робота. Для улучшения качества движения, включая плавный разгон и плавное торможение, применяются сплайны четвертого порядка. Заметим, что эта задача аналогична планированию траектории манипулятора с учетом его динамики [11]. По полученным сплайнам формируются и управляющие сигналы двигателей робота с учетом возможностей приводов и оптимизации движения [12, 13]. Задача управления может быть решена и при управлении группой роботов в ограниченном пространстве [14].

В данной работе для решения задачи автономной навигации робота и для выбора нужного движения применяется другой метод, основанный на применении конволюционной сети LSTM, который описывается ниже. После того как робот получает указание оператора, например, "принеси инструмент А, который лежит на лабораторном столе В", робот осуществляет поисковые движения RGB-D-камерой, используя известные алгоритмы обнаружения и распозна-

вания объектов [15]. В том случае, если объект не может быть обнаружен при текущем положении робота, он занимает новое положение с учетом того, что ему известно собственное положение на карте и положение лабораторного стола. Полученное изображение, содержащее искомый объект, передается в генератор образов. Туда же передается информация о текущем положении робота. Генератор образов формирует комплексный RGB-образ, включающий положение робота и цели, и передает его в качестве входного образа на конволюционную сеть LSTM, как показано на схеме системы управления КМР (рис. 4). Сеть непосредственно формирует управляющие сигналы линейной и угловой скоростями робота в соответствии с образом ситуации и поставленной задачей. На следующем такте работы системы робот определяет свое новое положение с помощью RGB-D-камеры и фотоэлектрического декодера и вновь передает информацию в генератор образов, который, в свою очередь, посылает образ новой ситуации в нейросеть. Сеть корректирует управляющие команды роботу и т. д.

После того как робот подъехал к столу, он должен найти и взять нужный инструмент. Задача обнаружения нужного инструмента на рабочем

столе и захвата его манипулятором с использованием конволюционной сети была решена нами ранее применительно к роботу-ассистенту хирурга, который искал требуемый хирургом инструмент [16]. Особенностью предложенного решения была параллельная конволюционная сеть, которая обнаруживала предмет по головному маркеру и одновременно определяла его положение на столе в целях формирования команд манипулятору для захвата объекта.

После того как робот захватил нужный объект, он должен передать его пользователю. С этой целью, используя внешнюю или собственную RGB-D-камеру, робот ищет оператора, определяет положение корпуса и рук оператора в пространстве помещения и перемещается к нему с помощью сети LSTM. При необходимости инструмент может быть безопасно передан непосредственно в руку оператора [17].

Конволюционная сеть LSTM

Структура сети. Остановимся более подробно на структуре конволюционной сети LSTM, которая и обеспечивает движение робота непосредственно по наблюдаемым обра-

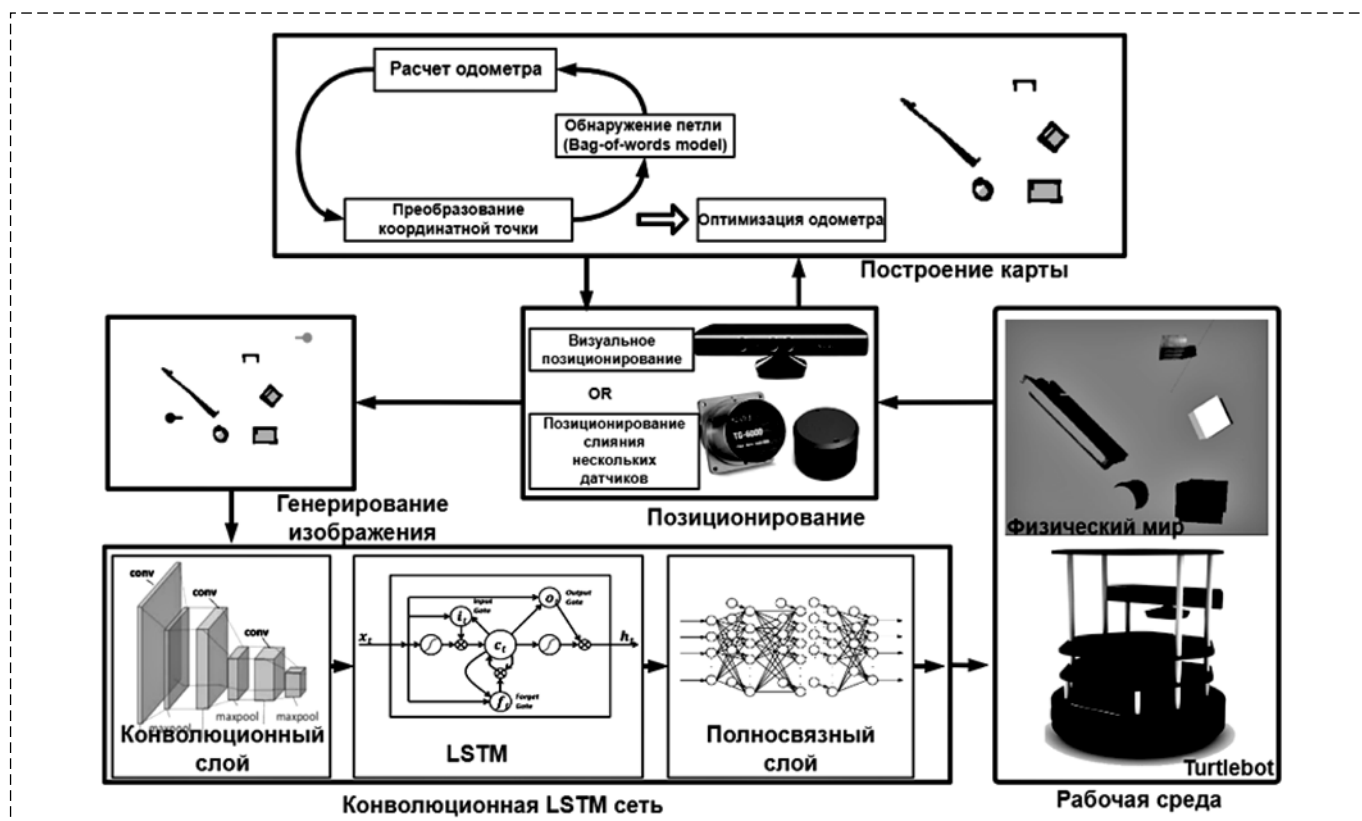


Рис. 4. Структура системы управления мобильным роботом Turtlebot, основанная на применении нейросети LSTM

Fig. 4. The structure of the control system of the mobile robot Turtlebot, based on the use of the LSTM neural network

зам. Сеть LSTM (Long short-term memory) была предложена в 1997 г. [18]. Ее название можно перевести как "нейронная сеть с долгой краткосрочной памятью". Описание работы сети можно найти, например, в работе [19]. Как и другие рекуррентные нейронные сети, сеть LSTM имеет форму цепочки повторяющихся модулей. Основное назначение сети — запоминание информации в течение длительных периодов времени. Благодаря своей структуре рекуррентная нейронная сеть анализирует полученную ранее информацию для решения последующих задач, например, используя уже полученные видеофрагменты для анализа последующих

Сеть состоит из трех основных частей, показанных на рис. 4: конволюционного слоя, блока LSTM и суммирующего полносвязного слоя.

Конволюционный слой используется для уменьшения нерелевантной информации в изображении и улучшения существенной информации. Он, в свою очередь, состоит из двух слоев: свертки и субдискретизации. Первый слой содержит ряд фильтров, предназначенных для удаления несущественной информации в изображении и выделения важной информации. Его можно описать формулой

$$x_{i,j} = f \left(\sum_{m=1}^F \sum_{n=1}^F w_{m,n} a_{i+m,j+n} + w_b \right), \quad (2)$$

где $x_{i,j}$ — характерный элемент изображения; $w_{m,n}$ — коэффициенты фильтра; $a_{i+m,j+n}$ — входные значения; w_b — порог срабатывания.

Слой субдискретизации обрезает изображение для того, чтобы уменьшить объем вычислений следующего за ним LSTM-слоя в соответствии с соотношением

$$\delta_{i,j}^l = \max(x_{i,j}), \quad (3)$$

где $\delta_{i,j}^l$ — параметр образа, полученного после субдискретизации.

Конволюционный слой содержит также слой, обеспечивающий преобразование трехмерной матрицы размерности $[W, H, N]$, где W — ширина полученного изображения, H — его длина, N — глубина, в вектор размерности $[1, WHN]$, который рассматривается в качестве входа для сети LSTM.

В качестве *функции ошибки* при настройке сети может использоваться среднее арифметическое значение или среднеквадратическая ошибка. В первом случае ошибка вычисляется как

$$E(y_{pre}, y_{true}) = \frac{k}{m} \sum_{i=1}^m |y_{pre}^i - y_{true}^i|, \quad (4)$$

где k — коэффициент усиления; m — число выборок; y_{pre}^i — желаемый вектор выхода; y_{true}^i — реальный вектор. Во втором случае

$$E(y_{pre}, y_{true}) = \frac{k}{m} \sqrt{\sum_{i=1}^m (y_{pre}^i - y_{true}^i)^2}. \quad (5)$$

В качестве вектора выхода сети, как уже говорилось, рассматриваются векторы линейной и угловой скоростей робота. Для ускорения сходимости процесса оптимизации рекомендуется в случае больших значений ошибки использовать вторую формулу, а при малых ошибках более эффективной оказывается первая.

Универсальным методом настройки (оптимизации) сети является метод градиентного спуска. В этом случае веса нейросети w находятся по формулам

$$w = w + \Delta w; \quad (6)$$

$$\Delta w = -\eta \nabla_w E(w), \quad (7)$$

где $\nabla_w E(w)$ — градиент ошибки, а параметр η определяет скорость сходимости. Однако его сложно применять к глубоким нейросетям, имеющим значительное число слоев. Для оптимизации таких нейросетей были предложены специальные методы, учитывающие предысторию изменения градиента в целях некоторой адаптации процесса сходимости. Одним из таких методов является метод RMSProp (Root Mean Square Propagation). В этом случае вычисляется усредненный по "истории" процесса сходимости квадрат модуля градиента:

$$r = \gamma r + (1 - \gamma) |g|^2, \quad (8)$$

в которой градиент $g = \nabla_w E(w)$, а параметр γ определяет "вес" накопленного среднего значения. Коррекция весов выполняется по формуле (6), в которой надо положить

$$\Delta w = -\frac{\eta}{\sqrt{\delta + r}} \nabla_w E(w).$$

Здесь параметр r определяется через усредненный квадрат модуля градиента по формуле (8), параметр η определяет скорость сходимости, а параметр δ назначается для того, чтобы в процессе оптимизации знаменатель не стал равен нулю. В нашей работе использовался именно этот метод.

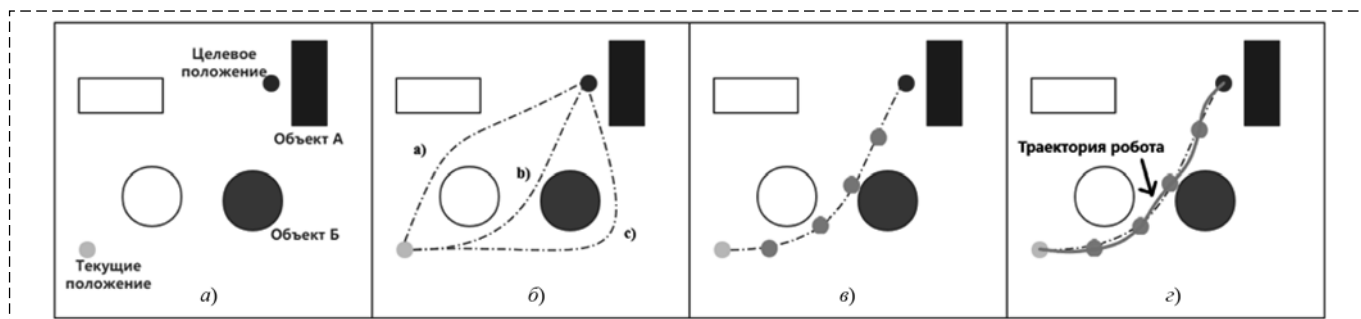


Рис. 5. Процесс диалогового управления мобильным коллаборативным роботом

Fig. 5. The process of interactive control of a mobile collaborative robot

Обучающая выборка. Для того чтобы обучить нейронную сеть, нужна обучающая выборка, которая представляет собой множество последовательных во времени изображений ситуации, включающей робота, заданную цель и внешнюю обстановку. Предполагается, что эти изображения могут быть получены с помощью RGB-D-камеры, установленной на роботе. Однако при работе в помещении задача может быть упрощена, поскольку для прокладки маршрута может быть достаточно двумерного плана помещения. В этом случае обучающая выборка представляет собой последовательность снимков ситуации в равноудаленные моменты времени. Пример показан на рис. 5. Оператор дал указание роботу: "Переместиться из текущего положения в целевое положение, обходя объект Б".

На рис. 5 показаны этапы процесса планирования движения: рис. 5, а — это карта, содержащая текущее положение робота, "объект А" и "объект Б"; рис. 5, б — на карте получены три маршрута, построенных традиционным методом (A^*). Здесь возможен диалог с оператором, который подтвердил маршрут *b*; рис. 5, в — на этом маршруте в опорных точках выбираются значения скорости и ускорения с помощью метода сплайнов третьего порядка с учетом заданных ограничений скорости МКР; рис. 5, г — на последнем этапе может проводиться моделирование движения робота с учетом его динамики с демонстрацией полученной траектории оператору.

Моделирование обученной системы управления МКР

В эксперименте в качестве входа конволюционной сети LSTM была выбрана матрица размерности $224 \times 224 \times 3$, а выходами сети при движении на плоскости являлись линейная и угловая скорости. Базовая обучающая выборка была получена традиционным методом путем

записи скорости мобильного робота и его соответствующих пространственных положений. Для обработки данных использовался метод скользящего окна. В каждой точке траектории t_i , $i = 1, 2, \dots, 20$, выбираются еще четыре точки в пределах длины скользящего окна, смещенные относительно текущего положения на $90k^\circ$, $k = 1, 2, 3, 4$. Таким образом, у нас получается 100 входных изображений, для можно получить 200 значений линейных и угловых скоростей.

Задачу формирования обучающей выборки можно обобщить. Пусть положение цели известно, а исходное положение робота может быть любым в данном помещении. Тогда на карту помещения можно наложить сетку, например, сетку 10×10 . Тогда полученное выше число выборок нужно увеличить в 100 раз. Это, конечно, увеличит время настройки сети, но зато придаст ей большую универсальность, поскольку задача, поставленная оператором, будет выполнена, каково бы ни было исходное положение робота. Процедура обучения занимает больше времени, но зато проводится только один раз.

Процедура моделирования работы обученного мобильного робота проводилась в программном обеспечении GAZEBO системы ROS. Были построены динамическая и кинематическая модель двухколесного робота Turtlebot. Предполагается, что для построения 2D-карты и определения положения робота в эксперименте используется RGB-D-камера, а положение и направление движения робота на 2D-карте передаются в генератор изображений. Программное обеспечение GAZEBO используется для моделирования движения МКР. Для управления движением МКР применяется предварительно обученная конволюционная сеть LSTM. Поскольку физическая среда компьютерного моделирования занимает часть центрального процессора, был создан новый узел ROS для вычисления конволюционной сети LSTM.

Результаты моделирования подтвердили возможность предлагаемого способа управления мобильным роботом. Подчеркнем, что конволюционная сеть, настроенная по сетке возможных положений, позволяет определять управление роботом при произвольном задании стартовой и целевой точек в рабочем пространстве. Ясно, что точность работы системы зависит от размерности сетки возможных положений. Однако, как уже отмечалось выше, задача существенно упрощается, если заранее задано исходное положение робота или настройка проводится на ряд заранее известных объектов в пределах одного и того же помещения.

Заключение

Проведенные исследования позволяют сделать вывод о том, что нейронные сети различного типа могут быть использованы на всех этапах создания КРТС, включая речевой диалог, распознавание объектов внешнего мира, автономное перемещение КМР в рабочем пространстве. В последнем случае предложенный способ управления КМР с использованием конволюционной сети LSTM позволяет вычислять команды управления роботом в реальном времени непосредственно по результатам наблюдения, что обеспечивает диалоговое управление сервисными КМР в реальном масштабе времени. Многочисленные эксперименты подтверждают, что этот метод обладает и хорошей отказоустойчивостью.

Основная проблема, связанная с управлением мобильным коллаборативным роботом с помощью нейронных сетей, заключается в сложности обучения, которое должно предусматривать, в общем случае, произвольное начальное положение робота и произвольное же задание цели в рабочем пространстве. Возможно, эту проблему в дальнейшем можно будет решить с использованием обучения с подкреплением. Однако в тех случаях, когда возможны ограничения как на исходное положение робота, так и на выбор маршрутов движения, предложенный метод управления может быть достаточно эффективен.

Нужно принять во внимание и эффект участия в управлении коллаборативным роботом человека-оператора, что предъявляет ряд требований к его психофизиологическим возможностям, включая пространственное мышление

и способность принимать решение в реальном масштабе времени [20].

Список литературы

1. Михайлов Б. Б., Назарова А. В., Ющенко А. С. Автономные мобильные роботы — навигация и управление // Известия ЮФУ. Технические науки, 2016. № 2(175). С. 48—67.
2. Ющенко А. С. Диалоговое управление роботами на основе нечеткой логики // Труды конференции "Экстремальная робототехника". С-Пб.: Политехника-сервис, 2015. С. 143—146.
3. Инь Шуай, Ющенко А. С. Коллаборативный робот — ассистент хирурга. С-Пб.: Политехника-сервис, 2019. С. 568—575.
4. Шуай Инь, Ющенко А. С. Диалоговая система управления роботом на базе теории конечных автоматов // Мехатроника, автоматизация и управление. 2019. Т. 20, № 11. С. 686—695.
5. Ющенко А. С. Интеллектуальное планирование в деятельности роботов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2005. № 3. С.5—18.
6. 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.: ФИЗМАТЛИТ, 2011. С.395—406
7. Nist'ér D., Naroditsky O., Bergen J. Visual odometry for ground vehicle applications. // Journal of Field Robotics. Vol. 23(1). 2006. P. 3—20
8. Девятериков Е. А. Алгоритм описания траектории мобильного робота по данным визуального одометра для автоматического возвращения к оператору // Наука и Образование. 2014. № 12. С.705—715.
9. Wang X., Lian Y., Li L. Localization of Autonomous Cars Using Multi-Sensor Data // Fusion Chinese Automation Congress. 2018. P. 4152—4155
10. Девятериков Е. А., Михайлов Б. Б. Визуальный одометр // Вестник МГТУ им. Н. Э. Сер Приборостроение, Спецвыпуск "Робототехнические системы". 2012. № 6. С. 68—82.
11. Ющенко А. С., Зенкевич С. Л. Основы теории управления манипуляционными роботами. М.: Изд. МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. 480 с.
12. Mellinger D., Kumar V. Minimum snap trajectory generation and control for quadrotors // IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2011. P. 2520—2525.
13. Carius J., Ranftl R., Koltun V., Hutter M. Trajectory Optimization with Implicit Hard Contacts // IEEE Robotics and Automation Letters. 2018. Vol 3. P. 3326—3323.
14. Zenkevich S. L., Nazarova A. V., Zhu H. Logical Control a Group of Mobile Robots // Smart Electromechanical Systems Studies in Systems. 2019. Vol. 174. P. 32—43.
15. Zhao Z. Q., Zheng P., Xu S., Wu X. Object Detection with Deep Learning: A Review // IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems 2019. Vol. 30. P. 3212—3232.
16. Yin S., Yuschenko A. Object Recognition of the Robotic System with Using a Parallel Convolutional Neural Network // Industry 40 Issues & New Intelligent Control Paradigms. 2019. Vol 272. P. 3—11.
17. Yin S., Yuschenko A. The application of the convolutional neural network to organize the work of a collaborative robot — surgeon assistant // Interactive Collaborative Robotics. 2019. P. 287—297.
18. Hochreiter S., Schmidhuber J. Long short-term memory // Neural Computation. 1997. N. 9 (8). P. 1735—1780.
19. Борисов Е. С. О рекуррентных нейронных сетях. URL: <http://mechanoid.kiev.ua/neural-net-rnn.html>
20. Ющенко А. С. Эргономические проблемы коллаборативной робототехники // Робототехника и техническая кибернетика. 2019. № 7 (2). С. 85—93.

Dialogue Control of Collaborative Robots Based on Artificial Neural Networks

A. S. Yuschenko, arkadyus@mail.ru, **Shuai Yin**, shuai.yin@yandex.ru,
Bauman Moscow State Technical University (BMSTU), Moscow, 105005, Russian Federation

Corresponding author: **Yuschenko Arkady S.** Dr. Science Tech., Professor,
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation,
e-mail: arkadyus@mail.ru

Accepted on July 27, 2021

Abstract

Collaborative robotics progress is based on the possibility to apply robots to the wide range activity of peoples. Now the user can control the robot without any special knowledge in robotics and safe. The price of such possibilities is complication of control system of robot which now has to acquire an opportunity of autonomous behavior under human's control, using the necessary sensors and elements of artificial intelligence. In our research we suppose the collaborative robot as mobile robotic device possible to fulfil some work under the human's speech demands not only in the same space with the human. We also suppose the necessity of bilateral dialogue human-robot to make it clear the task, the current situation, the state as robot as human. The complex task of control, or may be the collaboration of human with his artificial partner need new means of control, situation recognition, speech dialogue management. As a mean to solve the whole complex of problems we propose the combination of different artificial neural networks. Such as convolution networks for image recognition, deep networks for speech recognition, LSTM networks for autonomous movement of robot control in current situation. Investigations in the field of mobile and manipulation robots including the human-robot control have been proceeded for some years in the department "Robotic systems and mechatronics" BMSTU celebrating now it 70th years Jubilee. The reader may find some of the works in the bibliography. In result of all these investigations we obtain the service robot model which may find a wide application

Keywords: mobile collaborative robot, neural network, convolutional LSTM network, dialogue control, trajectory planning, movement control, images recognition, SLAM

For citation:

Yuschenko A. S., Shuai Yin Dialogue control of collaborative robots based on artificial neural networks, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2021, vol. 22, no. 11, pp. 567–576.

DOI: 10.17587/mau.22.567-576

References

1. **Mikhailov B. B., Nazarova A. V., Yuschenko A. S.** Autonomous mobile robots — navigation and control, *Izvestiya SFedU, Engineering Sciences*, 2016, vol. 2(175), pp. 48–67.
2. **Yuschenko A. S.** Dialogue Mode of Robot Control on the Base of Fuzzy Logic, *Transaction of the Conference Extreme Robotics*, S-Pb., 2015, pp. 143–146.
3. **Shuai Yin, Yuschenko A. S.** Collaborative robot — surgeon assistant, *Transaction of the Conference Extreme Robotics*, S-Pb., 2019, pp. 568–575.
4. **Shuai Yin, Yuschenko A. S.** Dialogue system of controlling robot based on the theory of finite automata, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2019, vol. 20, no. 11, pp. 686–695.
5. **Yuschenko A. S.** Intelligent Planning of Work of Robots, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2005, no. 3, pp. 5–18.
6. **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*, 2011, pp. 395–406.
7. **Nist'er D., Naroditsky O., Bergen J.** Visual odometry for ground vehicle applications, *Journal of Field Robotics*, 2006, vol. 23(1), pp. 3–20.
8. **Devtjarikov E. A.** Algorithm of the trajectory planning for a mobile robot return to operator using the visual odometer datum, *Nauka i Obrazovanie*, 2014, no. 12, pp. 705–715.
9. **Wang X., Lian Y., Li L.** Localization of Autonomous Cars Using Multi-Sensor Data, *Fusion Chinese Automation Congress*, 2018, pp. 4152–4155.
10. **Devtjarikov E. A., Mikhailov B. B.** Visual odometer, *Vestnik BMSTU Priboroostroenie*, 2012, Special issue no. 6 "Robotic Systems", pp. 68–82.
11. **Yuschenko A. S., Zenkevich S. L.** Basic of the manipulation robots control, Moscow, Publishing house of BMSTU, 2004, 480 p.
12. **Mellinger D., Kumar V.** Minimum snap trajectory generation and control for quadrotors, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2011, pp. 2520–2525.
13. **Carius J., Ranftl R., Koltun V., Hutter M.** Trajectory Optimization with Implicit Hard Contacts, *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2018, vol. 3, pp. 3326–3323.
14. **Zenkevich S. L., Nazarova A. V., Zhu H.** Logical Control a Group of Mobile Robots, *Smart Electromechanical Systems Studies in Systems*, 2019, vol. 174, pp. 32–43.
15. **Zhao Z. Q., Zheng P., Xu S., Wu X.** Object Detection with Deep Learning: A Review, *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2019, vol. 30, pp. 3212–3232.
16. **Yin S., Yuschenko A.** Object Recognition of the Robotic System with Using a Parallel Convolutional Neural Network, *Industry 40 Issues & New Intelligent Control Paradigms*, 2019, vol. 272, pp. 3–11.
17. **Yin S., Yuschenko A.** The application of the convolutional neural network to organize the work of a collaborative robot — surgeon assistant, *Interactive Collaborative Robotics*, 2019, pp. 287–297.
18. **Hochreiter S., Schmidhuber J.** Long short-term memory, *Neural Computation*, 1997, vol. 9, no. 8, pp. 1735–1780.
19. **Borisov E. S.** About recurrent neural networks, available at: <http://mechanooid.kiev.ua/neural-net-rnn.html>.
20. **Yuschenko A. S.** Ergonomic problems of collaborative robotics, *Robototekhnika i Technichskaya Kybernetika*, 2019, no. 7 (2), pp. 85–93.

A. V. Nazarova, Cand. Sc., avn@bmstu.ru, **Jianwen Huo**, Cand. Sc., huojianwen2008@hotmail.com,
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation

Corresponding author: **Jianwen Huo**, Cand. Sc., Bauman Moscow State Technical University,
Moscow, 105005, Russian Federation, e-mail: huojianwen2008@hotmail.com

Accepted on July 27, 2021

Application of Distributed Robotic Systems in Earthquakes: Search, Planning and Control Abstract

In order to search and rescue injured during earthquake, we proposed a method for multi-robots motion planning and distributed control in this paper. At first, we have created two probabilistic search models to considering the search area and the characteristics of sensors, which we used to search the injured targets. And after finding the targets, they are assigned to the mobile robots on the land to afford emergency rescue. In order to reach to the targets, a path planning method based on map matching is proposed. There are three parts here. Firstly, to obtain the global and local map: continuous ground images are first collected using the UAV's vision system, and subsequently, a global map of the ground environment is created by processing the collected images. The local map of the ground environment is obtained using the 2D laser radar sensor of the leader (UGA). Established the coordinate conversion relationship between UAV and UGV, unknown values during map matching are determined via the least square method. Secondly, our robots moved by group (leader-follower). The leader's path was planned globally and locally. The other multi-robots moved along the path planned by the leader. Thirdly, in order to plan and coordinate the robots in the group, the finite state machine is used to describe the logical level of control system for each robot in the group. After that, at the tactical level of the control system, the movement control law of formation maintaining mode and formation switching mode is designed.

Keywords: multi-robot, target search, probability theory, path planning, map matching, logical control level, tactical control level

For citation:

Nazarova A. V., Jianwen Huo. Application of Distributed Robotic Systems in Earthquakes: Search, Planning and Control, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2021, vol. 22, no. 11, pp. 577—584.

DOI: 10.17587/mau.22.577-584

УДК 681.51

DOI: 10.17587/mau.22.577-584

А. В. Назарова, канд. техн. наук, доц., avn@bmstu.ru,
Хо Цзяньвень, канд. техн. наук, huojianwen2008@hotmail.com,
Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)

Применение распределенных робототехнических систем при землетрясениях: поиск, планирование и управление

Обсуждаются новые методы планирования движения и управления группой роботов, способных к автономному поведению при землетрясениях. Процесс поиска включает наблюдение беспилотного летательного аппарата (БПЛА) за пострадавшей зоной и постановку текущих задач планирования движения наземных роботов. Для этого разработан способ поиска пострадавших с использованием аппарата теории вероятности. С учетом характеристик поисковой зоны и используемых датчиков созданы две вероятностные модели. После поиска цели предложен и исследован алгоритм построения программной траектории ведущего наземного робота на основе сопоставления карт. Разработана методика процедуры формирования глобальной карты с использованием изображений от камеры БПЛА и сформирована модель сопоставления карт в системе координат робота, которая обеспечивает получение требуемых параметров матрицы перехода в процессе сопоставления глобальной и локальной карт. Проведено глобальное и локальное планирование траектории движения ведущего робота. Разработаны логический и тактический уровни системы управления группой роботов, обеспечивающие управление перестроением и движением группы с сохранением конфигурации. Представлен способ решения задач логического управления группой беспилотных наземных аппаратов (БПНА) с использованием аппарата конечных автоматов. Отмечена необходимость использования логического уровня системы управления (СУ) группой БПНА для обеспечения смены конфигурации группы при движении. Разработан механизм планирования и координации поведения роботов в группе. В качестве компонентов логического уровня СУ каждым роботом в группе использованы конечные автоматы. Предложена эффективная стратегия предотвращения столкновений роботов при изменении топологии группы и одновременной смене положений роботов. На тактическом уровне СУ решена задача формирования закона управления движением группы наземных роботов в двух режимах: перестроения и движения с сохранением конфигурации. Приведены результаты компьютерного моделирования в среде ros_stage.

Ключевые слова: группа роботов, поиск цели, теория вероятности, планирование траектории, сопоставление карт, логический уровень управления, тактический уровень управления

Introduction

Because of the rapid development of intelligent manufacturing technology, communication sensors and artificial intelligence, the working environment of robots has expanded from a structured and certain manufacturing environment to an unknown and dynamic natural environment. The control of robots has also changed from single point control to distributed and scalable cluster control. As one of challenges facing by the academician, E. P. Popov's robot college in Moscow State Bowman University of technology, the professor S. L. Zenkevich has been focusing on researches on robot technology since 1990. His doctoral thesis is "The control, simulation and software of complex robot technology system" [2], which mainly concentrates on the structured manufacturing environment and makes use of the distributed robot system to do theoretical research on control, simulation and programming. This is a prelude that S. L. Zenkevich and his team started to study all aspects of distributed robots. It brings further theoretical research on the technology of organizing and controlling distributed mobile robots, which improves the autonomy and intelligence of robots in unknown, dynamic and complex conditions in different environments. The achievements of the theoretical research of the professor S. L. Zenkevich's team in this field in the past 10 years have facilitated the operation of combined robot technology tasks. In the distributed robot technology system, the sensor information of every robot can operate well with each other to make the system as a whole system to get higher data redundancy and better reliability. Several robots can work at the same time and provide solutions for many complex tasks with their interaction when doing complex tasks, which can not be operated by one robot itself. For example, distributed

robot system can be used to search for victims and convey necessary supplies to the disaster areas in earthquakes. In operations of search and rescue, a series of tasks need to be solved (Fig. 1), which integrates target search [5, 6], movement planning [7] and the control of a single robot and the entire system [8]. They include a victim search algorithm based on probability theory, a scheduling algorithm for robot trajectory planning based on a matching map which use UAV and main ground robot data and a reconfiguration control strategy for a ground robot team in an obstacle environment.

Using probability theory instrument to study the search process

We use probability theory to solve the target problem of searching for rescuers in earthquakes. There are many types of sensors used to detect survivors, which are acoustic, radar and so on. Each sensor has its own characteristics and advantages, but radar sensor and infrared sensor are more suitable for earthquake due to their detection distance to the target. In view of the characteristics of these sensors, we established a detection model and studied the victim search process of a single robot in discrete and continuous cases the victim search process of a single robot in discrete and continuous situation. Therefore, a series of joint search problems can be solved.

In order to achieve these goals, we build the topographic map and the probability model of the sensor firstly [9].

1. Topographic map model. Assuming that there is a $L_x \times L_y$ topographic map, including a priori information $\rho(x, y)$ about the probability density distribution of the target, the total probability of finding the target on the map is $\iint \rho(x, y) dx dy \leq 1$.

If we use a grid of size $M \times N$ to quantify the continuous map, the probability of finding the target on the grid map is

$$\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N c(m, n) \leq 1.$$

2. Sensor model. The conditional probability of target detection is very important in the case of grouped observations. If the target is in the visible area of the sensor in one observation, it will be recorded

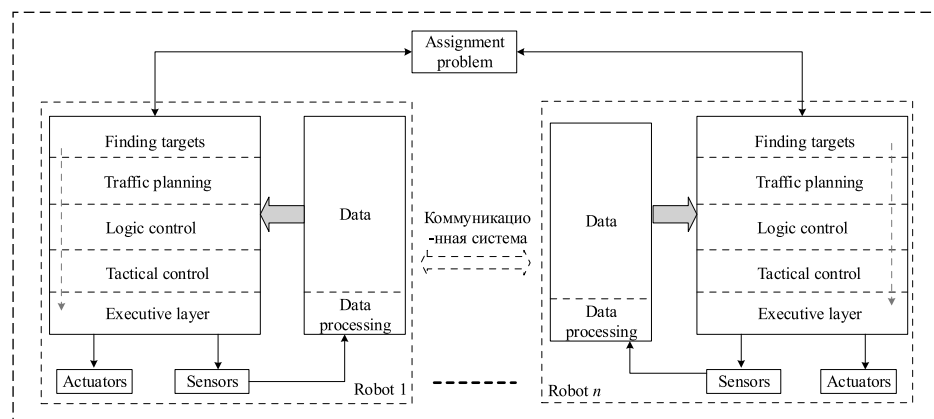


Fig. 1. The structure of tasks solved in a distributed robotic system

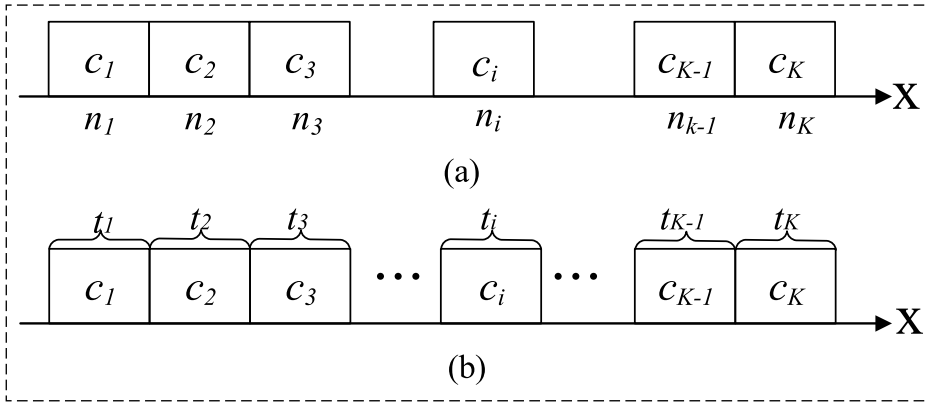


Fig. 2. Target detection models in discrete (a) and continuous (b) situations

as s and depended on the characteristics of the sensor and the average distance between the sensor and the target. When the observation is continuously searched, each observation requires a little time Δt . The conditional probability of detecting a target in a unit is $s = \alpha \Delta t$ and α depends on the characteristics of the sensor and the average distance between the sensor and the target. In continuous search situation, the probability of detecting a target is a continuously decreasing function, which is the distance between a specific sensor and the target $s = \alpha(z_k | l_k) \Delta t = \lambda(l_k)$ (Fig. 2). Discrete search has a similar function and the observation value $z_k \in \{1, 0\}$ and the number 1 indicate that the target is detected and the number 0 indicates that the target is not detected. l_k indicates the distance between the sensor and the target. $P_D \in [0, 1]$ indicates the probability that the sensor detects the target (taking the uncertainty of the observation into account). $P_F \in [0, 1]$ is the probability that the sensor sends out a false alarm. l_{in} is the maximum distance that the sensor can observe the target with a probability. l_{out} is the minimum distance that the sensor cannot detect the target. But if the probability of its existence is P_F , it means that the sensor sends out a "false alarm". Then,

$$\alpha(z_k | l_k) \Delta t = \begin{cases} P_D & (l_k \leq l_{in}); \\ P_D - \frac{(P_D - P_F)(l_k - l_{in})}{l_{out} - l_{in}} & (l_{in} < l_k < l_{out}); \\ P_F & (l_k \geq l_{out}). \end{cases} \quad (1)$$

If T is the search time, P_T is the probability of detecting the target within the time and then you must understand P_T when analyzing the parameters and the search procedure.

Now let us analyze the situation of K sensor observation units (Fig. 2). The target may be con-

tained in one of the units. In the discrete search, each cell is observed n_i times. In continuous search, we observed i unit during t_i time, then

$$\begin{cases} P_K^n = \sum_{i=1}^K c_i (1 - (1 - s)^{n_i}); \\ P_K^T = \sum_{i=1}^K c_i (1 - e^{-\alpha t_i}), \end{cases} \quad (2)$$

If several detectors explore the plane, then a joint search target strategy must be formed.

(a) Let one detector observe $2K$ units and the observation time of each unit is t_i^A (Fig. 3, a). Then, the probability of detecting the target in at least one cell in $T_1 = \sum_{i=1}^{2K} t_i^A$ time is

$$P_{2K}^{T_1} = \sum_{i=1}^{2K} c_i (1 - e^{-\alpha t_i^A}).$$

(b) If two detectors observe $2K$ units at the same time and each detector observes its own unit at t_i^B time and τ_j^B (Fig. 3, b), the probability of detecting a target in at least one cell at $T_2 = \sum_{i=1}^K t_i^B$ time and $T_2 = \sum_{j=K+1}^{2K} \tau_j^B$ is

$$(P_{2K}^{T_2})^B = 1 - \left(\sum_{i=1}^{2K} c_i e^{-\alpha t_i^B} + \sum_{j=K+1}^{2K} c_j e^{-\alpha \tau_j^B} \right).$$

(c) Let two detectors observe $2K$ units at different time. The first detector observes each unit at t_i^C time and after $T/2$, the second detector starts observes each unit at τ_j^C time as shown in Fig. 3, c. Then, the probability that the target is detected in at least one cell within $T_3 = 2 \sum_{i=1}^{2K} t_i^C$ and $T_3 = 2 \sum_{i=1}^{2K} t_i^C$ is

$$(P_{2K}^{T_3})^C = 1 - \sum_{i=1}^{2K} c_i e^{-\alpha(t_i^C + \tau_i^C)}.$$

(d) If two detectors examine $2K$ units at the same time and each detector examines its own unit in t_i^D time and τ_j^D (Fig. 3, d), the probability of detecting a target in at least one cell in $T_4 = \sum_{i=1}^{2K} t_i^D$ and $T_4 = \sum_{j=K+1}^{2K} \tau_j^D$ is

$$(P_{2K}^{T_4})^D = 1 - \sum_{i=1}^{2K} c_i e^{-\alpha(t_i^D + \tau_i^D)}.$$

If the probability c_i is symmetrically distributed, which is $c_K = c_{K+1}$, $c_{K-1} = c_{K+2}$..., the com-

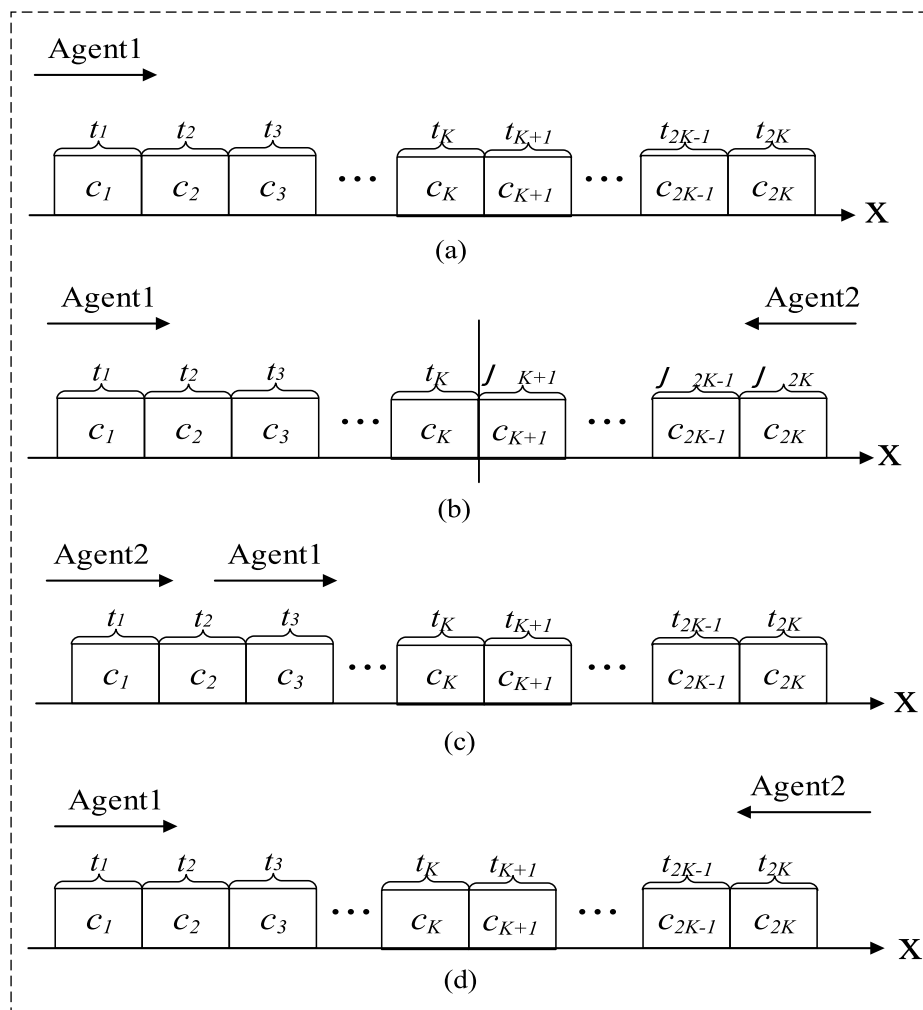


Fig. 3. Target detection strategies

parison of the four methods shows that: (a) $(P_{2K}^T)^a - (P_{2K}^T)^b \leq 0$. (b) because in the second situation, the search time is twice, which is $2(P_{2K}^T)^a - (P_{2K}^T)^b \geq 0$. (c) if the search time is doubled, the probability of target detection is halved $(P_{2K}^T)^a - (P_{2K}^T)^c = 0$ and $(P_{2K}^T)^b - (P_{2K}^T)^d = 0$. If the search parameters are unchanged, different search methods will lead to the same result. Under the same search time, there is no difference in the probability of target detection.

Therefore, when we perform the tasks, if the search parameters does not change, different search methods (with or without duplication) will lead to the same results. According to the number of existing drones, the search area is divided into Separate area.

Path planning of a group UGV based on map matching

When finding a target during the time of searching robots, we need to solve the trajectory planning prob-

lem so that other robots can deliver the required goods to the target. Obviously, the environment will change dramatically due to the earthquake so the existing map (Yandex map or Google map) becomes unimportant. Therefore, UAVs are suitable for the tasks of drawing global maps and global movement trajectory planning of robot groups because they provide a wide field of view and flexible maneuverability. Damaged buildings may collapse again due to repeated impacts (car impacts) and real obstacles that are not on the global map drawn on the basis of a series of drone images may appear. In order to solve this problem quickly, a leading robot on the ground team equipped with a camera, laser rangefinder and GPS must draw the local map. Accordingly, global and local maps must be compared to clarify the current situation. Fig. 4 shows the program trajectory drawing algorithm based on map matching.

In order to generate a global map, a series of operations must

be performed [10]: image registration, image splicing, object detection, and finally a global map. The main robot uses the SLAM method [11] to draw a local map based on the data of the laser rangefinder. Harris algorithm obtains a set of feature points (A') on the global map and compares them with similar points (A) on the local map. The relevance (c_θ) of the straight line segment connecting the feature points on the local map and the boundary of the obstacle on the global map can be recorded as:

$$c_\theta = \frac{L_{c_k}^L L_{c_{k+1}}^L \cdot R_{c_n}^R R_{c_{n+1}}^R}{|L_{c_k}^L L_{c_{k+1}}^L| \times |R_{c_n}^R R_{c_{n+1}}^R|}, \quad (3)$$

$$L_{c_k}^L \in A', R_{c_n}^R \in A.$$

In order to analyze the relevance of the data, a critical value c'_θ is defined. If $c_\theta < c'_\theta$, the line segment is not related to the edge of the obstacle, otherwise a corresponding pair of points will be generated Q and Q' (where $Q \in L_{c_k}^L$ and $Q' \in R_{c_n}^R$).

After getting the global graph and the local graph, it is necessary to start to solve their com-

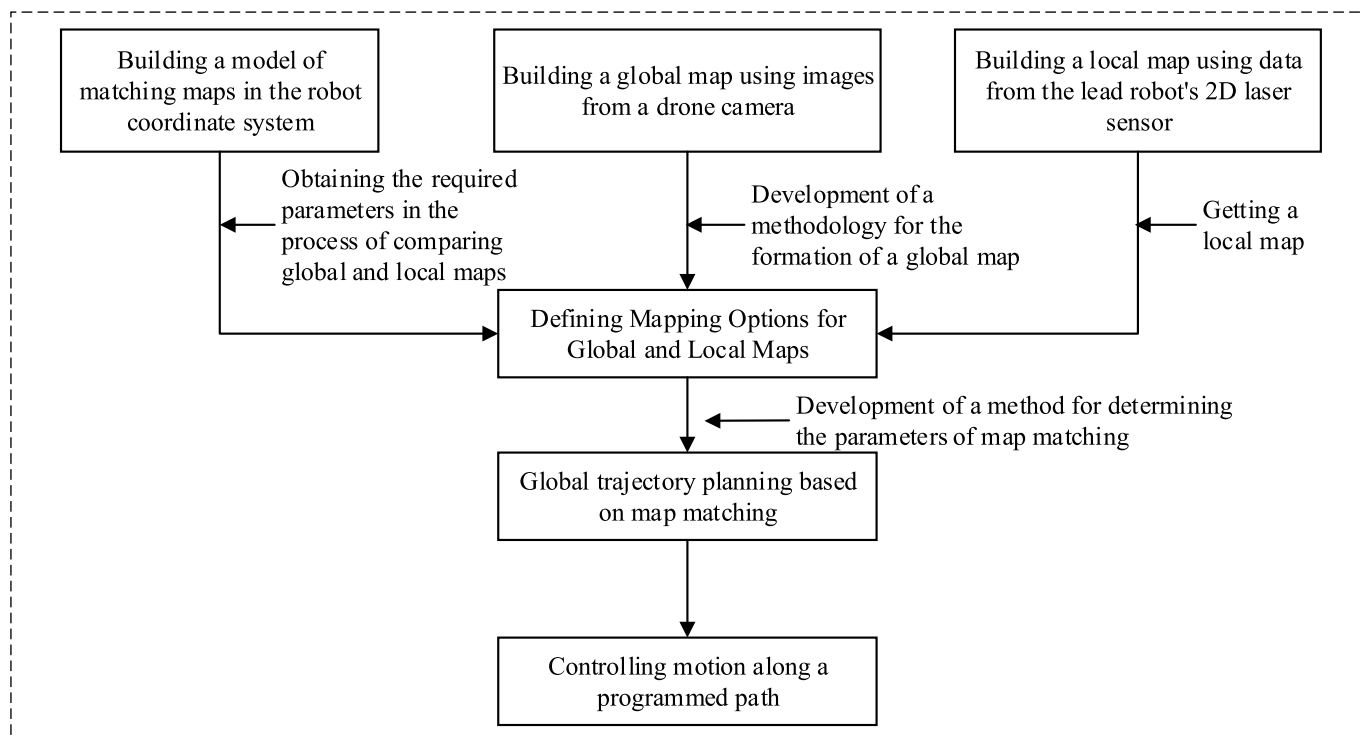


Fig. 4. Algorithm for constructing the trajectory of the leading robot

parison task. Supposing that it is a fixed point belonging to the terrain (Fig. 5) and its vector r_o is in the absolute coordinate system (CS). On the other hand, r_g is a vector defining the position M of the point in the drone coordinate system, obtained by its camera.

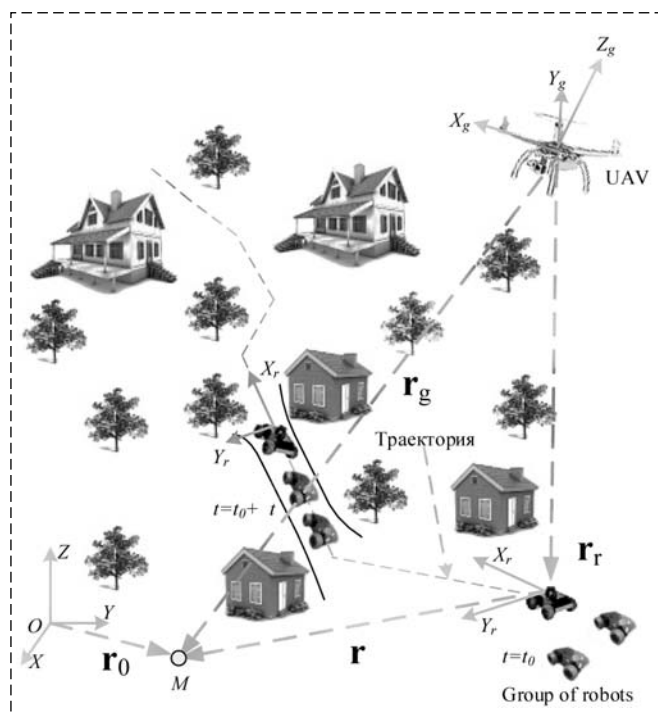


Fig. 5. Coordinate systems of the UAV and the leading robot of the ground group

from the drone coordinate system to the CS of the main ground robot, we get $r_r = T_r^{-1}T_g r_g$, where is the transition matrix from the coordinate system related to the drone and the main robot to the absolute CS. The position vector of the determined point T_g , T_r in the leading robot CS can be obtained using the scanning laser rangefinder to measure the endpoint coordinates to obtain.

Then the relation for comparing the global and local maps has the form [12]:

$$\mathbf{r}_r = \mathbf{T}\mathbf{r} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & x \\ \sin \theta & \cos \theta & y \\ 0 & 0 & m \end{bmatrix} \mathbf{r}, \quad (4)$$

where θ , x , y , m is the rotation angle, translation coordinates and scale between the vectors $\mathbf{r}_r$ and $\mathbf{r}$, respectively.

Use the error squared minimization method $\varepsilon = \min \|\mathbf{T}\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_{ri}\|^2$, $\mathbf{r}_{ri} \in Q$ and $\mathbf{r}_i \in Q'$. It's not difficult to find these singularity pairs of matrices $\mathbf{T}$:

$$\begin{cases} \mathbf{T} = \mathbf{r}_{ri}\mathbf{r}_i^{-1}; & \text{if } i = 4 \\ \mathbf{T} = (\mathbf{r}_i^T \mathbf{r}_i)^{-1} \mathbf{r}_i \mathbf{r}_{ri}; & i > 4 \end{cases} \quad (5)$$

Once the relationship of the objects in the map is established, we can proceed to solve the problem of global and local motion planning. According to the UAV map, the global planning generates a sequence of movement points of the mobile robot from the ini-

tial position to the target position, using an improved A* algorithm that takes into account the movement constraints. After obtaining the global trajectory, using the data from the scanner, the dynamic window method is used to locally plan the movement of the main robot along the global trajectory.

Reconfiguration control strategy of robot group in an environment with obstacles

In a constantly changing external environment, or when adjusting tasks assigned to a robot group, it is difficult to maintain a specific formation when the group of robots perform required actions. Therefore, in order to move the robot group quickly or avoid obstacles, the strategy of controlling the rearrangement of the machine group should be formulated at the logic level of the control system, and the method of controlling the movement of the robot group should be formulated at the tactical level [13].

The logical level of the robot group control system. The logic layer is responsible for changing the motion parameters of the robot group in an environment with obstacles, and coordinating their actions according to the results of the tasks performed by the corresponding robots. The robot group behavior realizes the following modes [14]: formation or dissolution of formations, movement of formations, robots joining formations, robots leaving formations, separation of formations and unification of formations.

The author developed a control method using the device of the terminal automatic device theory. This article uses a functional terminal automatic device and its description includes an additional function that is executed in each state. Fig. 6 shows the structure diagram of the logic level of the robot group control. The function of the group coordinator is to control the behavior of individual robots in the formation according to the operator's command, and to coordinate their actions according to the results of the manipulation performed by the respective robots. The coordinate azimuth instrument of the escort aircraft is recorded by a multi-import terminal automatic device (Mealy machine, Fig. 7, a). Its input is the value of a logical expression, and the output is a logical command to the corresponding robot.

Automata A_i are used to describe the logical model of individual robots, which is a Moore automaton (Fig. 7, b). Thus, the control system for an individual robot becomes two-level: the lower level

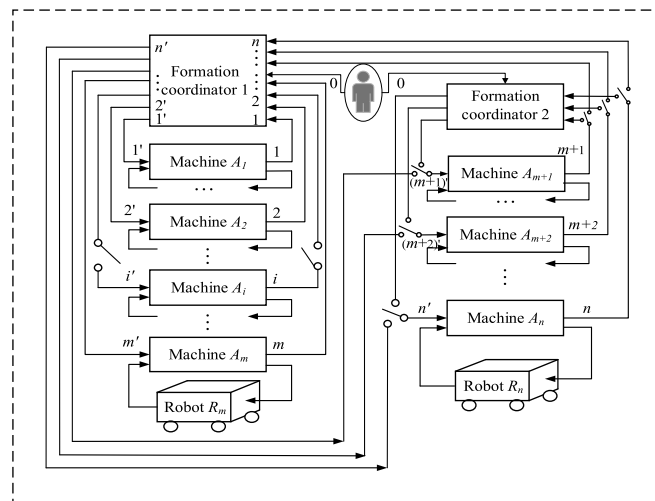


Fig. 6. Block diagram of logical control group robot

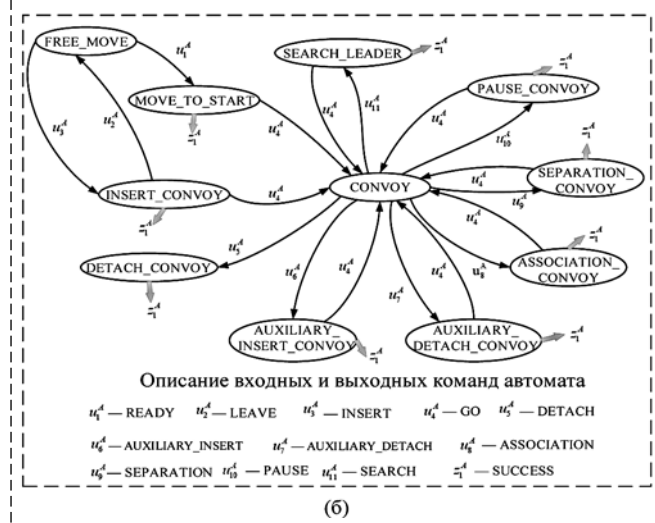
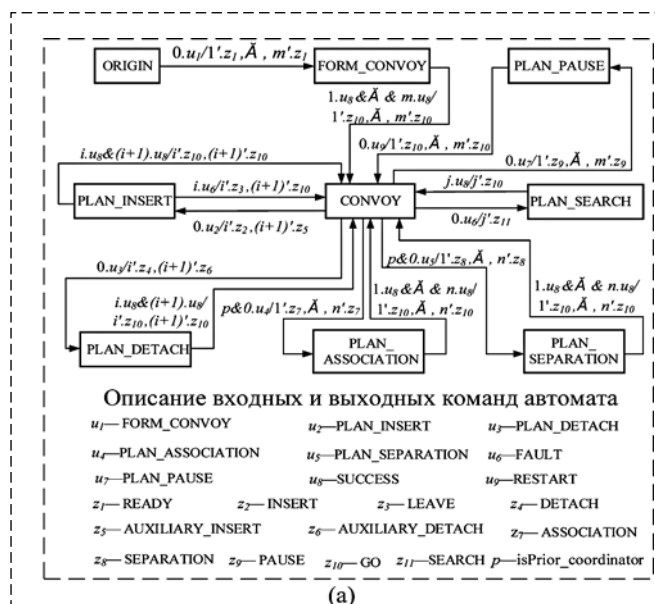


Fig. 7. Convoy coordinator as a control automaton (a); Logical model of a separate robot (b)

provides direct control of the actuator by virtue of the selected control law, and the upper (logical) one chooses one of these laws depending on the team of the group coordinator.

When the topology of the robot structure changes, it is necessary to ensure that collisions are prevented when it is rearranged. The corresponding algorithm is formulated according to the following steps [15]:

Step 1: Set the target position of each robot $F_g = \{\mathbf{r}'_i\}$, the safety distance between d robots, the speed module v , the critical value of the target distance d^* and the control command.

Step 2: Obtain the current coordinates of each robot $F_g = \{\mathbf{r}_{ij}\}$, calculate the distance from the current position $d_{ig}(t)$ to the target position $d_{ig}^2(t) = (\mathbf{r}_i - \mathbf{r}')^T (\mathbf{r}_i - \mathbf{r}')$, and obtain the distance between the robot R_i and R_j $d_{ij}^2(t) = \mathbf{r}_{ij}^T \mathbf{r}_{ij}$, $\mathbf{r}_{ij} = \mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j$.

Step 3: If $d_{ig}(t) \leq d^*$, that is, the robot has reached the target position, switch to step 6, otherwise, go to step 4.

Step 4: if $d_{ij}(t) > d$, the robot can move along its trajectory within time t , then go to step 3. If $d_{ij}(t) \leq d$, there is a possibility of collision between the robot and the robot goes to step 5.

Step 5: If $d_{ig}(t) > d_{ig}(t)$, the robot stops and skip, otherwise the robot stops. Then it goes to step 4.

Step 6: The algorithm ends.

The tactical level of the motion control system of the robot group. The essence of the tactical level is to develop a method to control the movement of the robot group in two modes: a reconstruction mode and a movement mode that saves the configuration.

When the topology changes, all robots know the initial and target positions of other robots so they know their planning trajectories and collision avoidance strategies. The reconstruction control method of each robot includes the method of relative distance and direction, which can be recorded as:

$$\begin{cases} v_i = k_{vi} l_i; \\ \omega_i = k_{\omega i} (\alpha_i - \theta_i), \end{cases} \quad (6)$$

where $l_i = \|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}'_i\|^2$, $\alpha_i = \arctg(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}'_i)$, $\mathbf{r}_i$, θ_i — the position and direction of the robot at the current time, $k_{\omega i}$ — parameter.

On the other hand, after the rearrangement, the robot group must follow the basic control law-move while maintaining a certain configuration. The control method is based on the three rules of the decentralized control algorithm proposed in [16]. Using these rules (separation, alignment, and formation), the control signal is calculated as follows:

$$\begin{cases} \mathbf{v}_i = k_v \mathbf{V}_i + k_c \sum_{|\mathbf{r}_{ij}| < d} \left\{ \frac{\mathbf{r}_{ij}}{|\mathbf{r}_{ij}|} (d - |\mathbf{r}_{ij}|) \right\} + k_e \varepsilon_{pi}; \\ \omega_i = k_{\omega} \varepsilon_{\phi i}, \end{cases} \quad (7)$$

where $\mathbf{v}_i = (v_{xi}, v_{yi})^T$; $k_v, k_c, k_e, k_{\omega}$ — parameter; $\mathbf{V}_i = (V_{xi}, V_{yi})^T$ — the speed of the center of gravity of the number i robot group in the coordinate system of the first robot. The position of the number i robot relative to the number j robot; d — the safety distance between the robots; $\mathbf{r}_{ij} = (x_{ij}, y_{ij})^T$ — the error of the number i robot relative to the specified current position; $\varepsilon_{\phi i}$ — the error of the number i robot relative to the specified current position.

Computer verification of the algorithm. The behavior of the formation in the configuration change process is simulated in the stage_ros environment, forming a hierarchical structure of the control system software, which includes four levels, the upper layer-the escort aircraft operation interface (intelligent layer); the strategy layer and the tactical layer. The strategy layer's task is to determine the subtasks of each robot (the escort aircraft coordinator). The tactical layer's output is the robot movement control signal; the lower layer-the external environment and the robot's mode (execution layer). The computer simulation results (Fig. 8, see the second side of the cover) have demonstrated the performance of the proposed method.

Conclusion

This article introduces the solution to the robot group's target search, motion planning and control tasks during the earthquakes and studies the method of searching for victims using the device of probability theory. It developed an algorithm to construct the software trajectory of the main ground robot based on the map comparison with the accompanying UAV data and studies the behavior planning and coordination methods to ensure the change of the robot group's motion state. At the tactical level, it forms two modes of motion control, which are group reconstruction mode and configuration saved motion mode.

References

1. Zenkevich S. L., Nazarova A. V., Yushchenko A. S. E. P. Popov as the Founder of the Scientific Robotic Technology's School in Bauman Moscow State Technical University, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2014, vol. 15, no. 11, pp. 3–7 (in Russian)

2. **Zenkevich S. L.** Control, simulation and software of complex robotic systems, doctors of physical and mathematical sciences, Moscow, 1994, 305 p. (in Russian)
3. **Nazarova A., Zhai Meixin.** Problems of using robotic systems in earthquake res-cue operations, *Robotics and Technical Cybernetics*, 2018, vol.6, no.3, pp. 31–38 (in Russian).
4. **Vorotnikov S., Ermishin K., Nazarova A., Yuschenko A.** Multi-agent Robotic Systems in Collaborative Robotics, In: Ronzhin A., Rigoll G., Meshcheryakov R. (eds) *Interactive Collaborative Robotics. ICR 2018. Lecture Notes in Computer Science*, Springer, vol 11097, pp. 270–279.
5. **Nazarova A. V., Zhai Meixin.** The Application of Multi-agent Robotic Systems for Earthquake Rescue, In: Kravets A. (eds) *Robotics: Industry 4.0 Issues & New Intel-ligent Control Paradigms. Studies in Systems, Decision and Control*, Springer, 2020, vol. 272, pp. 133–146.
6. **Nazarova A. V., Zhai Meixin.** Distributed Solution of Problems in Multi Agent Robotic Systems, In: Gorodetskiy A., Tarasova I. (eds) *Smart Electromechanical Systems. Studies in Systems, Decision and Control*, Springer, 2018, vol. 174, pp. 107–124.
7. **Huo Jianwen, Zenkevich S. L., Nazarova A. V., Zhai Meixin.** Path Planning Based on Map Matching in UAV/UGV collaboration system, *International Journal of Intelligent Unmanned Systems*, 2021, vol. 9, no. 2, pp. 81–95.
8. **Zenkevich S. L., Zhu Hua.** Control of a Group of Mobile Robots Moving in the Convoy Type Formation, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 1, pp. 30–34 (in Russian).
9. **Zenkevich S. L., Nazarova A. V., Zhai Meixin.** The Movement Planning of Mobile Robots in Performing Search Task Based on Probability Theory, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2019, vol. 20, no. 9, pp. 560–567 (in Russian).
10. **Zenkevich S. L., Nazarova A. V., Huo Jianwen.** Control of mobile robot group using collaborative drone, *Robotics and Technical Cybernetics*, vol. 7, no. 3, pp. 208–214 (in Russian).
11. **Zenkevich S. L., Zhu Hua, Huo Jianwen.** Experimental Study of Motion of the Mobile Robots Moving in the Convoy Type Formation, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2018, vol. 19, no. 5, pp. 331–335 (in Russian).
12. **Zenkevich S. L., Nazarova A. V., Huo Jianwen.** Formation Control of Ground Multi-agent System Using Quadcopter with Camera, In: Kravets A. (eds) *Robotics: Industry 4.0 Issues & New Intelligent Control Paradigms. Studies in Systems, Decision and Control*, Springer, 2020, vol. 272, pp. 113–124.
13. **Zenkevich S. L., Nazarova A. V., Huo Jianwen.** Logic control of the movement of a group of mobile robots in an environment with obstacles, *Automation. Modern Technologies*, 2020, vol. 74, no. 10, pp. 470–475 (in Russian).
14. **Zenkevich S. L., Nazarova A. V., Zhu Hua.** Logical Control a Group of Mobile Robots, In: Gorodetskiy A., Tarasova I. (eds) *Smart Electromechanical Systems. Studies in Systems, Decision and Control*, Springer, 2019, vol. 174, pp. 31–43.
15. **Zenkevich S. L., Nazarova A. V., Huo Jianwen.** Dynamic Switching of Multi-agent Formation in Unknown Obstacle Environment, In: Gorodetskiy A., Tarasova I. (eds) *Smart electromechanical systems. Studies in Systems, Decision and Control*, Springer, 2020, vol. 261, pp. 73–87.
16. **Zenkevich S. L., Galustyan N. K.** Decentralized Control of a Quadcopter Swarm, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 11, pp. 774–782 (in Russian).



**24–25 февраля 2022 г. в г. Барнаул пройдет
II Международный научно-практический форум
по передовым достижениям в науке и технике
(SciTech 2022)**

Организатор форума: Ассоциация поддержки научных исследований.

Цель форума — теоретический анализ фундаментальных и прикладных вопросов научно-технологического развития России, прорывных технологий и передовых научных исследований в области органической и неорганической химии, физики, энергетики, материаловедения, компьютерных, инженерных, а также смежных наук.

Материалы форума будут опубликованы в коллективных научных монографиях, издаваемых в рамках книжных серий ведущего мирового издательства «Springer Nature». Каждая глава будет проиндексирована в наукометрических базах "Scopus" (Q3-Q4) и "Web of Science". Специально отобранные статьи будут отправлены на публикацию в высокорейтинговые научные журналы.

ПРОБЛЕМАТИКА И СЕКЦИИ

Форум станет уникальной площадкой для обсуждения актуальных вопросов научно-технологического развития России, прорывных технологий и передовых научных исследований.

СЕКЦИИ:

1. Новая парадигма научно-технологического развития России и мира.
2. Достижения в области интеллектуальных систем и вычислений.
3. "Умные" системы и инновации.
4. Фундаментальные и прикладные исследования в точных науках.
5. Новые материалы и технологии: проблемы, достижения, перспективы.
6. Будущее энергетики: в поисках инновационной и устойчивой модели развития.
7. Сельскохозяйственные и продовольственные системы: технологические вызовы и перспективы развития.
8. Современное STEM-образование для опережающего развития.

КОНТАКТЫ

Петерс Кристина Андреевна

Тел.: +7 (3852) 73-05-82. E-mail: mail@conferences.science

<https://conferences.science/conferences/scitech-2022.html>

В. В. Серебряный, канд. техн. наук, доц., vsereb@bmstu.ru,
А. А. Бошляков, канд. техн. наук, доц., boshlyakov@bmstu.ru,
С. В. Калинин, канд. техн. наук, доц., kalinichenkosv@bmstu.ru,
А. И. Огородник, ст. преподаватель, alexander.ogorodnik@bmstu.ru,
К. В. Коновалов, ассистент преподавателя, bmstu.konovlov2011@yandex.ru,
Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)

Шагающий робот для перемещения по вертикальным и произвольно ориентированным в пространстве поверхностям

Рассматриваются вопросы проектирования шагающего робота с захватными устройствами (ЗУ), позволяющими роботу передвигаться по произвольно ориентированным в пространстве поверхностям. Подобные роботы актуальны прежде всего для осмотра и диагностики состояния различных промышленных конструкций. В рамках данной работы предложена модель двухопорного робота с захватными устройствами на опорах, позволяющими крепиться к опорным поверхностям с небольшой кривизной, произвольно ориентированным в пространстве. Для обеспечения крепления к подобным опорным поверхностям робот спроектирован с пятью степенями свободы. Важным критерием является возможность ловкого передвижения по поверхностям. Кроме того, одна из степеней свободы робота была сделана линейной, что облегчает переступание через преграды и позволяет реализовывать более простые алгоритмы шагания.

При креплении робота сразу двумя ЗУ за опорные поверхности кинематическая цепь замыкается, и без дополнительных мер это может приводить к возникновению нежелательных сил и моментов в звеньях робота. В данной работе предлагается использовать два метода совместно — реализовать импедансное управление за счет введения обратной связи по оценке момента на основе измерения токов двигателя и обеспечить податливость ЗУ за счет собственной упругости. Проведено математическое моделирование робота с учетом кинематики конструкции и детальных моделей исполнительных двигателей и усилителя мощности на полевых транзисторах, показавшее возможность снижения нежелательных усилий в звеньях робота, возникающих в процессе крепления робота за две опорные поверхности одновременно. Наилучшие результаты были достигнуты при управлении вектором тока синхронного двигателя и использовании сигналов тока для реализации импедансного управления.

Также приведены упрощенная схема привода, реализующая векторное управление током исполнительного двигателя, и структурная схема системы управления, позволяющей реализовать различные походки в полуавтоматическом режиме и в режиме управления от оператора.

Ключевые слова: шагающий робот вертикального перемещения, система управления, моделирование движения, позиционно-силовое управление

Введение

Появление мобильных роботов вертикально-по перемещения (РВП) обусловлено необходимостью автоматизации различных технологических операций, для выполнения которых необходимо совершать движение или находиться в режиме прикрепления к наклонным и вертикальным поверхностям. Такие роботы со специальным оборудованием на борту могут найти применение в различных сферах, таких как энергетика, химическая и нефтегазовая промышленность, строительство и обслуживание зданий, судостроение, а также при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций [1, 2].

К настоящему времени в мире создано большое число прототипов таких роботов, в конструкции которых используются все основные типы движителей (колесный, гусеничный шагающий) и способы удержания (магнитный,

вакуумный, воздушный винт, механические захваты, адгезионные материалы) [3–5].

В России в течение многих лет работы по созданию таких роботов ведутся в Институте проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН [6], а также в ряде других организаций [7, 8].

Примерно 20 лет назад сформировалось новое направление в развитии РВП — это создание наиболее сложных с точки зрения как механики, так и управления роботов, предназначенных для движения по сложно-ориентированным в пространстве поверхностям, способных перемещаться по горизонтальным, вертикальным, наклонным, потолочным поверхностям и в процессе движения осуществлять переход с одной поверхности на другую [9].

Анализ конструктивных схем показал, что подобный робот должен иметь как минимум две группы захватных устройств (ЗУ): с помощью одной группы ЗУ он удерживается на

поверхности, другая группа ЗУ в то же время перемещается и стыкуется с другой поверхностью, расположенной под произвольным углом по отношению к первой [9, 10].

Здесь следует сделать замечание, что для случаев перехода с горизонтальной на вертикальную поверхность существуют технические решения, в которых используется один механизм удержания [11].

Большинство известных прототипов роботов имеют механическую систему, состоящую либо из двух платформ, соединенных шарниром, либо имеющую две и более опор с ЗУ [9].

Общей проблемой подобных роботов является необходимость параллельной ориентации одной из опор относительно плоскости при движении в режиме "переход с одной поверхности на другую". Использование только шарниров вращения в указанных конструкциях требует обеспечения их согласованной работы при выполнении каждого шага, что вызывает необходимость применения сложной системы управления с развитой сенсорной подсистемой [12]. Кроме того, возможность возникновения нежелательных усилий и моментов при одновременном зацеплении двумя или более ЗУ за опорную поверхность требует введения податливости в приводы [13–15]. Данная задача может быть решена в том числе с помощью оценки сил и моментов в звеньях манипулятора по токам исполнительных двигателей [16].

Конструктивная схема шагающего робота с пятью степенями подвижности

В конструкции шагающего робота, разработанного на кафедре "Робототехнические системы и мехатроника" МГТУ им. Н. Э. Баумана, предложено использовать четыре шарнира вращения и один шарнир линейного перемещения, что позволяет упростить алгоритмы перемещения в режиме "движение по плоскости", в том числе по плоскостям, имеющим разную пространственную ориентацию, и "переход с одной поверхности на другую". В последнем случае упрощается реализация поступательного перемещения опоры, что позволяет создавать достаточное усилие прижима к поверхности в случае использования вакуумных захватных устройств [17]. Механическая система робота (рис. 1) включает в себя центральное звено 1 с телескопическим механизмом поступательно-

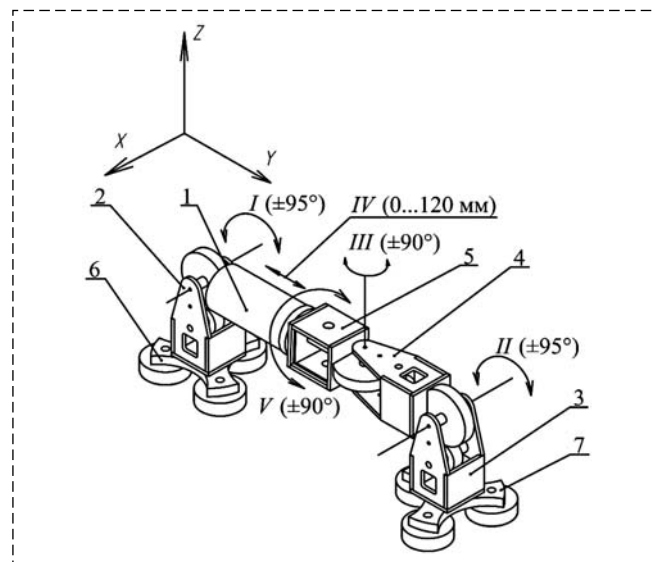


Рис. 1. Конструктивная схема шагающего робота с пятью степенями подвижности

Fig. 1. A design diagram of a walking robot with five degrees of freedom

го перемещения вдоль оси Y (стрелка IV), боковые звенья 2 и 3 с установленными на их торцах опорами 6 и 7 соответственно с захватными устройствами. С одной стороны центральное звено 1 связано с боковым звеном 2 через шарнир вращения вокруг оси X (стрелка I), с другой стороны к центральному звену крепится шарнир вращения 5 вокруг оси Y (стрелка V). Шарнир 5 связан шарниром вращения вокруг оси Z (стрелка III) со звеном 4, которое, в свою очередь, связано с боковым звеном 3 через шарнир вращения вокруг оси X (стрелка II). Применение узла поступательного перемещения позволяет менять расстояние между центрами опор 6 и 7. Для удержания на вертикальных поверхностях используются электромагниты.

Перемещение робота осуществляется следующим образом. Перед началом движения обе опоры 6 и 7 фиксируются на плоской поверхности (вертикальной, наклонной, горизонтальной). Затем одна из опор расфиксируется и перемещается. Реализованы два типа движений:

- приставными шагами, за счет работы шарниров вращения боковых звеньев 2 и 3 (стрелки I и II), а также механизма поступательного перемещения центрального звена 1 (стрелка IV), что показано на рис. 2, а;
- переворотом одной из опор на 180° , за счет работы или только шарниров вращения 2 и 3, или совместной с ними работы механизма поступательного перемещения звена 1 в целях изменения длины шага.

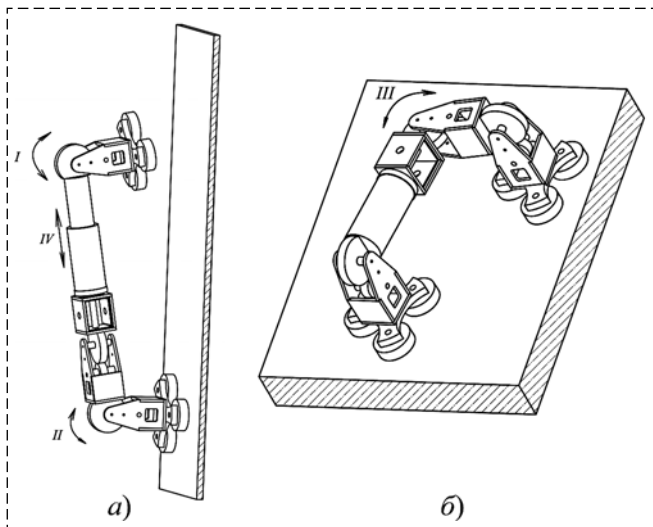


Рис. 2. Принцип движения приставным шагом с использованием вращения шарниров боковых звеньев (стрелки I и II) и возвратно-поступательного движения механизма линейного перемещения (стрелка IV) (а) и принцип изменения направления движения (стрелка III) (б)

Fig. 2. The principle of movement by an attached step using the rotation of the hinges of the side links (arrows I and II) and the reciprocating movement of the linear movement mechanism (arrow IV) (a) and direction movement change principle (arrow III) (b)

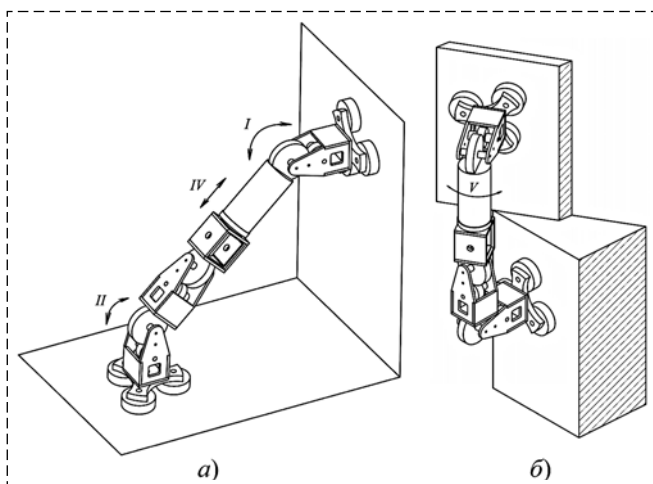


Рис. 3. Принцип перехода с одной поверхности на другую (стадия I) (а) и принцип движения механизма по плоскостям, расположенным под некоторым углом друг к другу (б)

Fig. 3. The principle of relocation from one surface to another (stage I) (a) and the principle of movement of the mechanism along planes located at an angle to each other (b)

Изменение направления движения осуществляется с помощью шарнира вращения звена 4 (стрелка III), при фиксации на поверхности одной из опор и положении "над поверхностью" другой, что показано на рис. 2, б.

При переходе с поверхности на поверхность, например с горизонтальной на вертикальную, что показано на рис. 3, а, за счет вращения шарниров звеньев 2 и 3 (стрелки I и II) происходит фиксация одной из опор на вертикальной

поверхности (стадия 1). Затем также за счет вращения шарниров 2 и 3 (стрелки I и II) на вертикальной поверхности фиксируется вторая опора (стадия 2). С помощью механизма поступательного перемещения звена I (стрелка IV) возможно изменять положение опоры на поверхности и обеспечивать ее плоскопараллельное движение.

Обеспечение движения механизма по плоскостям, расположенным под некоторым углом друг к другу, осуществляется за счет вращения шарнира 5 (стрелка V), что показано на рис. 3, б.

Аппаратная реализация системы управления робота

Структурная схема аппаратной части системы управления робота изображена на рис. 4 и содержит следующие основные части:

- пульт управления на базе персонального компьютера, обеспечивающий управление роботом и отображение видео- и телеметрической информации;
- блок управления (отнесенный), обеспечивающий питание робота и каналы связи робота с пультом управления;
- бортовую аппаратную часть системы управления, размещенную на борту робота.

Управление и питание робота осуществляется по проводам. Питание робота обеспечивается напряжением 24 В от импульсного источника питания, с последующим вторичным преобразованием к необходимым уровням напряжений. Управление осуществляется по интерфейсу RS-232. Передача видеосигнала с камер наблюдения робота на монитор пульта управления, а также телеметрическая информация передаются по беспроводным каналам данных за счет Wi-Fi Роутера и Wi-Fi приемопередатчиков.

Пульт управления разработан на основе персонального компьютера. Программная часть пульта управления состоит из специального программного обеспечения, обеспечивающего управление роботом, а также программного обеспечения, обеспечивающего отображение телеметрической и видеoinформации для оператора.

Блок управления включает в себя преобразователь питания, преобразователь интерфейса и приемопередатчик беспроводного канала данных, установленные в единый корпус.

Wi-Fi роутер обеспечивает беспроводной канал связи пульта оператора с одноплатным

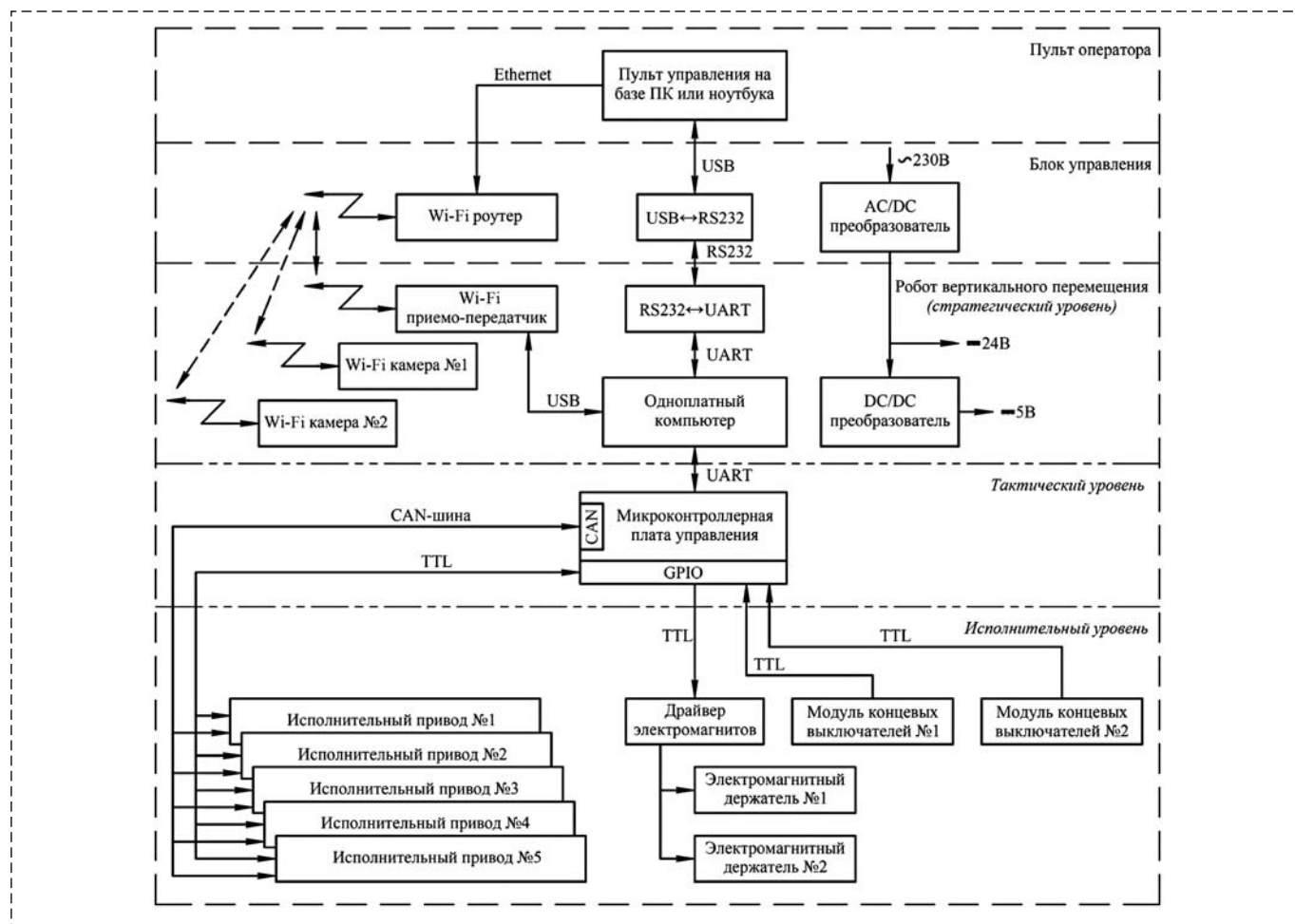


Рис. 4. Структурная схема аппаратной части системы управления шагающего робота с пятью степенями подвижности
Fig. 4. Diagram of the control system hardware part for a walking robot with five degrees of freedom

компьютером робота вертикального перемещения, служащий для передачи телеметрической информации. Также за счет Wi-Fi роутера обеспечивается передача видеоинформации с камер на пульт оператора. Беспроводной канал связи должен обеспечить оператору возможность управления роботом в ручном и полуавтоматическом режимах, а также предоставить оператору возможность контроля за роботом в автоматическом режиме управления.

Робот имеет многоуровневую систему управления, включающую в себя стратегический, тактический и исполнительный уровни.

Стратегический уровень управления робота

Аппаратная часть стратегического уровня управления робота содержит:

- одноплатный компьютер с преобразователями интерфейсов передачи данных, служащий основой управления робота;

- беспроводные приемопередатчики, обеспечивающие передачу видеоинформации оператору.

Одноплатный компьютер является основой для реализации системы управления роботом. Встроенное программное обеспечение позволяет планировать движения, формировать команды для тактического уровня управления и осуществлять обмен данными с пультом оператора. Также на одноплатный компьютер ложится задача управления роботом в автоматическом режиме и передача телеметрической информации оператору на пульт управления в различных режимах управления.

Тактический уровень управления робота

Тактический уровень управления реализуется на базе микроконтроллерной платы с DSP-микроконтроллером. На этом уровне в режиме реального времени осуществляется

согласованное управление устройствами исполнительного уровня.

На тактическом уровне выполняется преобразование команд управления движением, поступающих со стратегического уровня управления, в программу управления, которая определяет законы согласованного движения во времени всех звеньев механического устройства с учетом технических характеристик блока приводов (в первую очередь, ограничений на обобщенные скорости, ускорения и силы). Также в задачу тактического уровня входит реакция на внешние воздействия и контактные взаимодействия, фиксируемые в том числе за счет концевых выключателей. С использованием концевых выключателей обеспечивается контроль за правильным ориентированием ЗУ шагающего робота относительно опорной поверхности, а также управление этими ЗУ для надежной фиксации робота в различных положениях.

Исполнительный уровень управления робота

Исполнительный уровень управления робота включает в себя следующие основные элементы:

- исполнительные приводы, осуществляющие управление звеньями робота;
- захватные устройства;
- концевые выключатели.

Структурная схема исполнительного привода изображена на рис. 5. Исполнительные приводы содержат следующие основные элементы:

- драйвер исполнительного двигателя (ИД);
- исполнительный двигатель (СДПМ) со встроенными датчиками холла (ДХ);
- инкрементный датчик положения/скорости (ДС) ротора;
- редуктор (Р);
- абсолютный датчик положения (ДП).

Драйвер привода представляет собой плату, содержащую микропроцессор и необходимые интерфейсы для взаимодействия с тактическим уровнем, обработки информации с датчиков и управления бесколлекторным двигателем.

Задающее воздействие и другие сигналы управления передаются на драйвер с тактического уровня микропроцессорной платой управления по интерфейсу CAN. Драйвер выполняет управление двигателем согласно управляющим командам в реальном времени с контролем параметров привода. В случае неисправности исполнительного привода с исполнительного уровня передается сигнал о неполадке с помощью выхода с открытым коллектором. Дополнительно с тактического уровня передается цифровой сигнал о срочной остановке привода. Исполнительный двигатель является бесколлекторным синхронным трехфазным микродвигателем, фазы которого первоначально коммутируются по датчику Холла в режиме шестишагового управления, по-

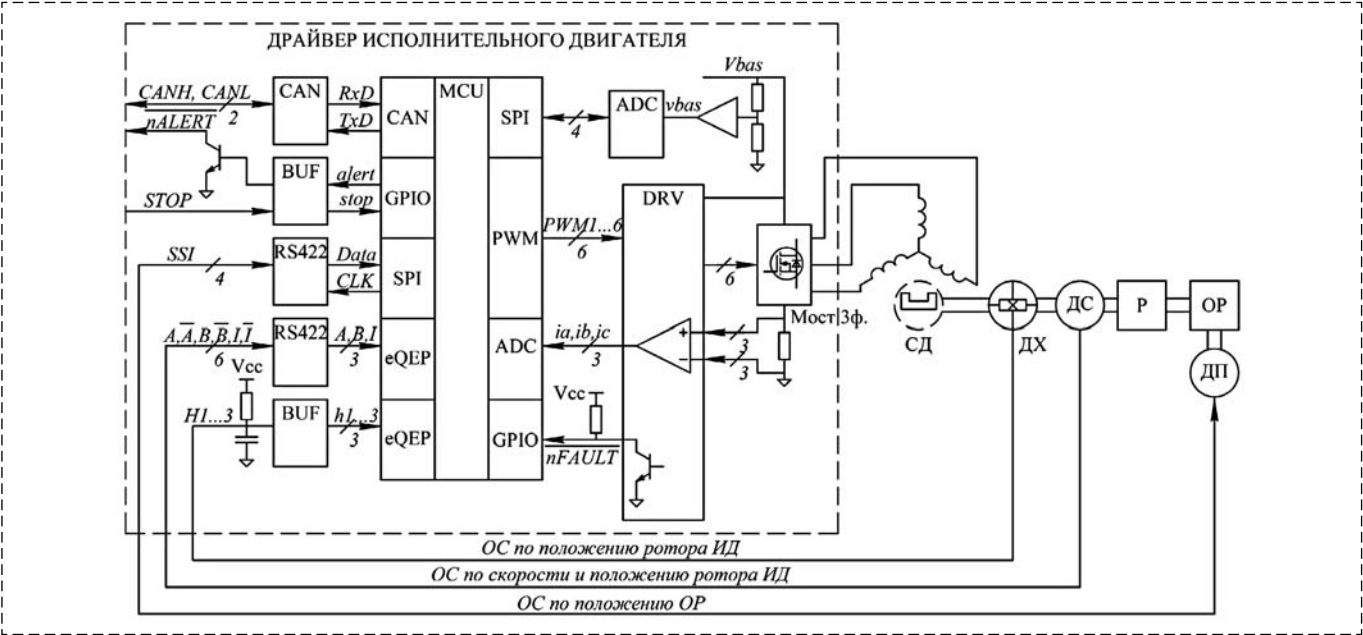


Рис. 5. Схема исполнительного привода звена робота

Fig. 5. Robot link drive scheme

сле пересечения референтной метки нулевого положения инкрементного датчика положение ротора отсчитывается с помощью квадратурного декодера eQEP, встроенного в микроконтроллер для осуществления работы в режиме вентильного двигателя. Инкрементальный датчик положения ротора служит как для реализации устойчивого управления без предельных циклов, вызванных люфтом редуктора, так и для получения сигнала скорости при реализации параллельной коррекции. Абсолютный датчик положения (ДП) служит для контроля реального положения объекта регулирования (ОР) — звена робота, также эти данные учитываются на верхних уровнях управления. Абсолютный датчик положения подключается по интерфейсу SSI, который реализуется с помощью настройки встроенного в микроконтроллер модуля SPI и драйвера с дифференциальными сигналами RS422. Для реализации ограничения выходного момента и токов фаз исполнительного привода используются данные измерения напряжения на токовых шунтах, стоящих в цепях истока нижних ключей трехфазного моста на полевых МОП транзисторах. Также данные измерения тока используются для формирования сигнала оценки момента двигателя и обеспечения податливости за счет введения дополнительной обратной связи (ОС) по моменту в регулятор положения. Для корректировки закона управления и диагностики силовых цепей проводится измерение напряжения питания с помощью внешнего АЦП.

Моделирование движения робота

Для исследования движения робота была использована математическая модель, учитывающая электромеханические процессы в приводах звеньев. За основу математической модели привода была взята модель синхронного двигателя, описываемая следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} U = \left(\mathbf{R} + \frac{d\mathbf{L}}{dt} \right) \mathbf{I} + \mathbf{L} \frac{d\mathbf{I}}{dt} + \frac{d\mathbf{\Psi}}{dt}; \\ M = \mathbf{I}^T \frac{\partial \mathbf{\Psi}}{\partial \theta} + \frac{1}{2} \mathbf{I}^T \frac{\partial \mathbf{L}}{\partial \theta} \mathbf{I} + \frac{\partial w_c}{\partial \theta}; \\ J\varepsilon = M + M_{out}; \\ \frac{d\Omega}{dt} = \varepsilon; \\ \frac{d\theta}{dt} = \Omega, \end{cases}$$

где $\mathbf{U} = \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix}$ — вектор напряжения на обмотках электродвигателя; $\mathbf{I} = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$ — вектор токов

в обмотках; $\mathbf{\Psi}$ — вектор потокосцепления магнитов с обмотками; $\mathbf{R}$ — матрица сопротивления обмоток; $\mathbf{L}$ — матрица индуктивностей и взаимноиндуктивностей обмоток; M — крутящий момент электродвигателя; M_{out} — внешний момент; ε — угловое ускорение; Ω — угловая скорость; θ — угловое положение ротора; w_c — зубцовый магнитный момент.

Для моделирования синхронных двигателей с постоянными магнитами были приняты следующие допущения: синусоидальность магнитодвижущей силы, постоянная индуктивность в зависимости от положения ротора, пренебрежимо малая взаимная индуктивность обмоток, бесконечно большое сопротивление между обмотками двигателя. С учетом данных допущений получена упрощенная система дифференциальных уравнений в форме Коши:

$$\begin{cases} \frac{d\mathbf{I}}{dt} = \mathbf{L}^{-1} \left[\mathbf{U} - \mathbf{R}\mathbf{I} - \frac{\partial \mathbf{\Psi}}{\partial \theta} \Omega \right]; \\ M = \mathbf{I}^T \frac{\partial \mathbf{\Psi}}{\partial \theta} + \frac{\partial w_c}{\partial \theta}; \\ J\varepsilon = M + M_{out}; \\ \frac{d\Omega}{dt} = \varepsilon; \\ \frac{d\theta}{dt} = \Omega, \end{cases}$$

где матрицы принимают следующий вид:

$$\begin{aligned} \mathbf{L}^{-1} &= \begin{bmatrix} 1/L_0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/L_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/L_0 \end{bmatrix}; \\ \mathbf{R} &= \begin{bmatrix} R_0 & 0 & 0 \\ 0 & R_0 & 0 \\ 0 & 0 & R_0 \end{bmatrix}; \\ \frac{\partial \mathbf{\Psi}}{\partial \theta} &= -n\psi_m \begin{bmatrix} \sin(n\theta) \\ \sin(n\theta + 2\pi/3) \\ \sin(n\theta + 4\pi/3) \end{bmatrix}; \\ \frac{\partial w_c}{\partial \theta} &= -2nw_{cm} \sin(2n\theta) \end{aligned}$$

со следующими параметрами: ψ_m — амплитуда потокосцепления; w_{cm} — амплитуда зубцового момента; n — число пар полюсов синхронной машины.

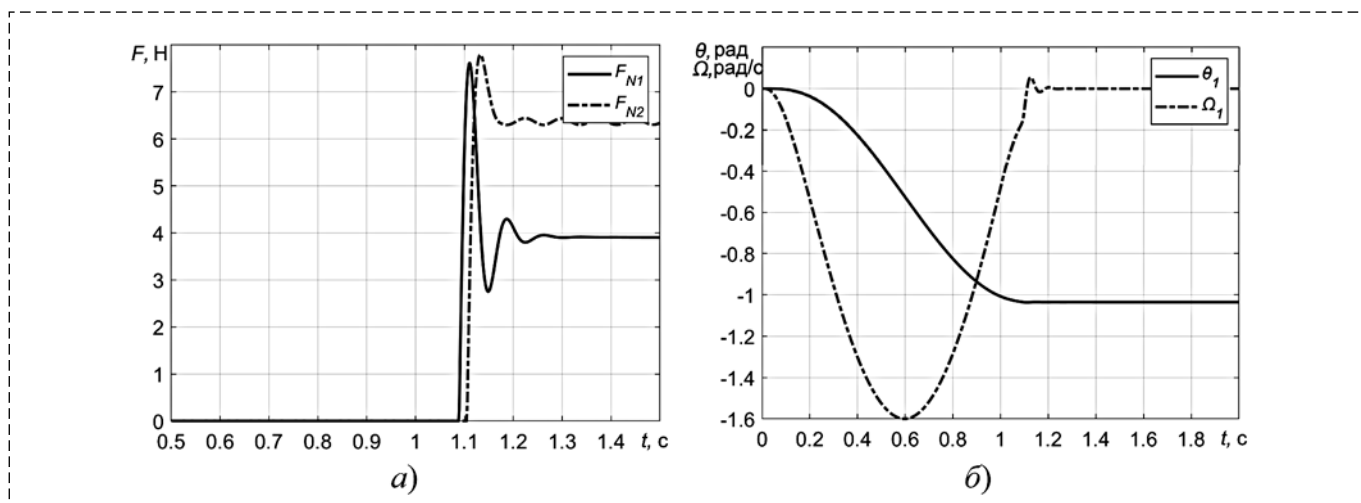


Рис. 6. Нормальная сила реакции опоры при подведении ЗУ к второй опорной поверхности (а) и угловое положение и скорость звена II (б)

Fig. 6. Normal reaction force of the support when bringing the gripper to the second support surface (a) and angular position with the speed of link II (б)

В модели оконечного усилителя мощности на полевых транзисторах использовались идеализированные модели транзисторов MOSFET, учитывающие сопротивление открытого и закрытого каналов, а также напряжение прямого смещения и эквивалентного сопротивления обратного диода.

Управление синхронным двигателем с постоянными магнитами осуществлялось векторным методом. Проводился анализ различных вариантов управления как вектором токов, так и вектором напряжения синхронного двигателя. В контуре регулятора тока использовался ПИ регулятор после преобразования координат с помощью преобразований Кларка и Парка. Кроме того, для увеличения податливости системы управления в корректирующее устройство по положению вводился сигнал по току. Для расчетов применялась идеализированная математическая модель редуктора, учитывающая передаточное отношение, момент инерции, но предполагающая отсутствие люфта и абсолютную жесткость механической передачи.

Для исследования динамики робота полученная модель приводов была использована совместно с 3D-моделью робота в прикладном пакете Simcar Muttibody. Сравнение различных законов управления проводилось на основе анализа движения и процесса подведения захватного устройства к опорной поверхности с учетом контактных сил взаимодействия. На рис. 6, а изображены графики нормальной силы реакции опоры F_{N1} для импедансного управле-

ния с управлением вектором тока двигателя и F_{N2} для позиционного управления с управлением вектором напряжений двигателя при упоре ЗУ в опорную поверхность. По графикам можно определить, что нормальная сила реакции опоры при управлении вектором токов и позиционно-силовом управлении имеет меньшее значение в установившемся режиме, чем при управлении вектором напряжений.

Проведенное моделирование показало, что введение коррекции по току позволяет добиться большей податливости системы управления и избежать повышенных сил в кинематической замкнутой цепи, а также исключить колебательность переходных процессов при зацеплении обоими ЗУ за опорную поверхность. Кроме того, обеспечивается меньшее значение силы действующих токов в данном процессе. Графики силы токов для управления вектором токов изображены на рис. 7, а (см. вторую сторону обложки), а для векторов напряжений — на рис. 7, б.

Заключение

В статье приведены результаты разработки двухопорного шагающего робота с пятью степенями подвижности для перемещения по произвольно ориентированным в пространстве поверхностям. На основе проведенного моделирования показано, что предложенная конструкция, обеспечивающая ориентацию опор в трех плоскостях, позволяет реализовать различные походки и упрощает реализацию алго-

ритма перехода с одной поверхности на другую. Применение позиционно-силового управления в сочетании с управлением векторами тока синхронных исполнительных двигателей с постоянными магнитами обеспечивает уменьшение контактных сил взаимодействия с опорной поверхностью при шагании, контроль крутящих моментов в звеньях робота, а также уменьшение силы токов при замыкании кинематической цепи. Применение роботов с подобной кинематической схемой целесообразно прежде всего для задач инспекции и осмотра различных сооружений, а также корпусов транспортных систем со сложной геометрией наружных поверхностей.

Список литературы

1. **Dethe R. D., Jaju S. B.** Developments in wall climbing robots: a review // International journal of engineering research and general science. 2014. Vol. 2, N. 3. P. 33–42.
2. **Zhao Z., Shirkoobi G.** Climbing robot design for NDT inspection // Human-Centric Robotics: Proceedings of CLAWAR 2017: 20th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines. 2018. P. 259–266.
3. **Kolhalkar N. R., Patil S. M.** Wall climbing robots: A review // International Journal of Engineering and Innovative Technology. 2012. Vol. 1, N. 5. P. 227–229.
4. **Das A., Patkar U. S., Jain S., Majumder S., Roy D. N., Char S. K.** Design principles of the locomotion mechanism of a wall climbing robot // Proceedings of the 2015 Conference on Advances In Robotics. 2015. P. 1–7.
5. **Сырых Н. В., Чашухин В. Г.** Роботы вертикального перемещения с контактными устройствами на основе постоянных магнитов: конструкции и принципы управления контактными устройствами // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2019. № 5. С. 163–173.
6. **Градецкий В. Г., Князьков М. М.** Состояние и перспективы развития роботов вертикального перемещения для экстремальных сред // Робототехника и техническая кибернетика. 2014. № 1. С. 9–16.
7. **Аверьянов Е. В., Коваленко Б. Б., Костин А. В., Пелепас Е. И., Подураев Ю. В., Яковлев С. Ф.** Основные аспекты создания отечественных технологических мобильных роботов вертикального перемещения // Мехатроника, автоматизация, управление. 2013. № 8. С. 23–27.
8. **Товарнов М. С., Быков Н. В.** Математическая модель механизма перемещения мобильного гусеничного робота с магнитно-ленточным принципом вертикального перемещения // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2019. № 3. С. 74–84.
9. **Градецкий В. Г., Вешников В. Б., Калинин С. В., Кравчук Л. Н.** Управляемое движение мобильных роботов по произвольно ориентированным в пространстве поверхностям. М: Наука, 2001. 359 с.
10. **Zhu H., Guan Y., Wu W., Zhou X., Zhang L., Zhang X., Zhang H.** The superior mobility and function of W-Climbot—A bio-inspired modular biped wall-climbing robot // 2011 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. IEEE, 2011. P. 509–514.
11. **Серебряный В. В., Лапин Д. В., Мокаева А. А.** Экспериментальные исследования динамики мобильного робота с механизмом вертикального перемещения на магнитных гусеничных движителях // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2020. № 4. С. 68–75.
12. **Юревич Е. И.** Сенсорные системы в робототехнике. СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2013. 100 с.
13. **Егоров И. Н.** Позиционно-силовое управление робототехническими и мехатронными устройствами // Изд-во Владим. гос. ун-та, 2010. 192 с.
14. **Siciliano B., Villani L.** Robot force control. Springer Science & Business Media, 2012. Vol. 540. 146 p.
15. **Calanca A., Muradore R., Fiorini P.** A review of algorithms for compliant control of stiff and fixed-compliance robots // IEEE/ASME transactions on mechatronics. 2015. Vol. 21, N. 2. P. 613–624.
16. **Серебряный В. В., Бошляков А. А., Огородник А. И.** Импедансное позиционно-силовое управление в роботах и механизмах с кинематическими замкнутыми цепями // Технологии аддитивного производства. 2019. Т. 1. № 1. С. 24–35.
17. **Gradetsky V. G., Knyazkov M. M., Semenov E. A. and Sukhanov A. N.** Parametrical analysis of vacuum contact devices for wall climbing robots // CLAWAR 2020: 23rd International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines, Moscow, Russian Federation, 24–26 August 2020. P. 67–74.

Walking Robot for Moving on Vertical and Arbitrarily Oriented Surfaces

V. V. Serebrennyj, vsereb@bmstu.ru, **A. A. Boshlyakov**, boshlyakov@bmstu.ru,
S. V. Kalinichenko, kalinichenkosv@bmstu.ru, **A. I. Ogorodnik**, alexander.ogorodnik@bmstu.ru,
K. V. Konovalov, konovalov_kv@bmstu.ru,

Bauman Moscow State Technical University (National Research University), Moscow, 105005, Russian Federation

Corresponding author: Ogorodnik Alexander I., Senior Lecturer, Bauman Moscow State Technical University (National Research University), Moscow, 105005, Russian Federation, e-mail: alexander.ogorodnik@bmstu.ru

Accepted on July 27, 2021

Abstract

The article deals with the design of a walking robot with gripping devices that allow the robot to move on arbitrarily oriented surfaces in space. Such robots are relevant primarily for the inspection of various industrial structures. A model of a two-support robot with gripping devices that allow it to be attached to support surfaces with a small curvature, but arbitrarily oriented in space, is proposed. To ensure attachment to the support surfaces, the robot is designed with five degrees of freedom. An important criterion is the possibility of dexterous movement on surfaces. One of the degrees of freedom of the robot was made linear, which makes it easier to step over obstacles and allows you to implement simpler walking algorithms. When the robot is attached to the supporting surfaces by two gripping devices at once, the kinematic chain is closed. This

can lead to an increase in forces and moments in the robot's links. In this paper, it is applied to use two methods of controlling the drives of the links together — the implementation of impedance control by introducing feedback on the evaluation of the moment based on the motor currents and ensuring the pliability of the gripping devices due to its own elasticity. A mathematical simulation of the robot was carried out, which showed the possibility of reducing the forces in the robot links when attaching the robot to two support surfaces at the same time. The best results were achieved when controlling the current vector of a synchronous motor and using current signals to implement impedance control.

Keywords: Walking robot, vertical movement robot, control system, motion modeling, positional-force control

For citation:

Serebrennyj V. V., Boshlyakov A. A., Kalinichenko S. V., Ogorodnik A. I., Kononov K. V. Walking Robot for Moving on Vertical and Arbitrarily Oriented Surfaces, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2021, vol. 22, no. 11, pp. 585—593.

DOI: 10.17587/mau.22.585-593

References

1. Dethe R. D., Jaju S. B. Developments in wall climbing robots: a review, *International journal of engineering research and general science*, 2014, vol. 2, iss. 3, pp. 33—42.
2. Zhao Z., Shirkoobi G. Climbing robot design for NDT inspection, *Human-Centric Robotics: Proceedings of CLAWAR 2017: 20th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines*, 2018, pp. 259—266.
3. Kolhalkar N. R., Patil S. M. Wall climbing robots: A review, *International Journal of Engineering and Innovative Technology*, 2012, vol. 1, iss. 5, pp. 227—229.
4. Das A., Patkar U. S., Jain S., Majumder S., Roy D. N., Char S. K. De-sign principles of the locomotion mechanism of a wall climbing robot, *Proceedings of the 2015 Conference on Advances In Robotics*, 2015, pp. 1—7.
5. Syrykh N. V., Chashchukhin V. G. Wall-climbing robots with permanent-magnet contact devices: design and control concept of the contact devices, *Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Teoriya i sistemy upravleniya*, 2019, iss. 5, pp. 163—173 (in Russian).
6. Gradetsky V. G., Knyazkov M. M. Present and future trends of wall climbing robot's development for extreme conditions, *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika*, 2014, iss. 1, pp. 9—16 (in Russian).
7. Averianov E. V., Kovalenko B. B., Kostin A. V., Pelepas E. I., Poduraev Yu. V., Yakovlev S. F. Main aspects of domestic wall climbing robot design, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2013, iss. 8, pp. 23—27.
8. Tovarnov M. S., Bykov N. V. A mathematical model of the locomotion mechanism of a mobile track robot with the magnetic-tape principle of wall climbing, *Problemy Bashinostroeniya i Nadezhnosti Mashin*, 2019, iss. 3, pp. 74—84.
9. Gradetsky V. G., Veshnikov V. B., Kalinichenko S. V., Kravchuk L. N. Controlled movement of mobile robots on surfaces arbitrarily oriented, *Mocow, Nauka*, 2001, 359 p. (in Russian).
10. Zhu H., Guan Y., Wu W., Zhou X., Zhang L., Zhang X. and Zhang H. The superior mobility and function of W-Climbot — A bio-inspired modular biped wall-climbing robot, *2011 IEEE International Conference on Robotics and Bio-mimetics, IEEE*, 2011, pp. 509—514.
11. Serebrennyj V. V., Lapin D. V., Mokaeva A. A. Experimental studies of the dynamics of a mobile robot with a vertical movement mechanism on magnetic caterpillar movers, *Problemy bashinostroeniya i Nadezhnosti Mashin*, 2020, iss. 4, pp. 68—75 (in Russian).
12. Yurevich E. I. Sensor systems in robotics, *St. Petersburg, Izdatel'stvo Politehnicheskogo Universiteta*, 2013, 100 p.
13. Egorov I. N. Position-force control of robotic and mechatronic devices, *Izdatel'stvo Vladimirskogo Gosudarstvennogo Universiteta*, 2010, 192 p.
14. Siciliano B., Villani L. Robot force control. Springer Science & Business Media, 2012. vol. 540, 146 p.
15. Calanca A., Muradore R., Fiorini P. A review of algorithms for compliant control of stiff and fixed-compliance robots, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2015. vol. 21, iss. 2, pp. 613—624.
16. Serebrennyj V. V., Boshlyakov A. A., Ogorodnik A. I. Impedance position-force control in robots and mechanisms with kinematic closed chains, *Tekhnologii Additivnogo Proizvodstva*, 2019, vol. 1, iss. 1, pp. 24—35.
17. Gradetsky V. G., Knyazkov M. M., Semenov E. A. and Sukhanov A. N. Parametrical analysis of vacuum contact devices for wall climbing robots, *CLAWAR 2020: 23rd International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines*, Moscow, Russian Federation, 24—26 August 2020, pp. 67—74.

В. П. Носков, канд. тех. наук, заведующий сектором НИИ СМ, доц. кафедры СМ7, noskov_mstu@mail.ru,
Д. В. Губернаторов, магистр, gubernatorovdanil@gmail.com,
Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)

Экстремальная навигация по 3D-изображениям в мобильной робототехнике

Рассмотрена актуальная задача определения всех шести координат текущего положения мобильного робота (беспилотного летательного аппарата) по 3D-дальномерным изображениям (объемным облакам точек), формируемым бортовым 3D-лазерным сенсором в телесном угле обзора при движении (полете) в неизвестной среде. Предложен алгоритм экстремальной навигации, основанный на использовании методов многомерной оптимизации. Описаны правила вычисления используемого при оптимизации функционала разности 3D-изображений внешней среды. Исследована форма функционала разности 3D-изображений для различных сред (помещения, индустриально-городская среда, пересеченная и лесистая местности). Сформулированы требования к характеристикам сенсора и геометрии внешней среды, выполнение которых обеспечивает корректную постановку и решение задачи экстремальной навигации. Описаны оптимальные способы сканирования окружающего пространства и обоснованы условия, выполнение которых обеспечивает решение навигационной задачи предложенным алгоритмом в реальном времени (в темпе движения) при обработке 3D-изображений, формируемых современными 3D-лазерными сенсорами. В частности, описана зависимость между частотой формирования 3D-изображений и угловыми и линейными скоростями движения, обеспечивающая попадание в многомерный интервал унимодальности функционала разности 3D-изображений, что гарантирует прямой поиск его глобального минимума в реальном времени. Опробованы различные методы прямого поиска глобального минимума функционала и выбраны наиболее быстродействующие для рассматриваемого случая. Выполнена оценка точности решения задачи навигации и предложен способ снижения накапливаемой ошибки, основанный на использовании для коррекции вычисленного значения текущих координат более "старого" 3D-изображения, имеющего пересечение зоны обзора с зоной обзора текущего изображения. Предложенный способ, являющийся модификацией метода опорных изображений, позволяет снизить суммарную ошибку, растущую пропорционально числу циклов решения задачи экстремальной навигации, до значений, обеспечивающих автономное функционирование транспортных роботов и БПЛА в заранее не подготовленных и неизвестных средах. Эффективность предложенных алгоритмических и разработанных программно-аппаратных средств экстремальной навигации подтверждена натурными экспериментами, проведенными в реальных условиях различных сред.

Ключевые слова: лазерный сенсор, 3D-дальномерное изображение, экстремальная навигация, задача многомерной оптимизации

Введение

Центральной и наиболее актуальной для востребованной сейчас автономной робототехники является навигационная задача, решаемая бортовыми средствами. Наиболее эффективными с точки зрения точности и полноты ее решения являются средства видеонавигации на основе светолокационных лазерных сенсоров. Существует множество методов и алгоритмов решения навигационной задачи по данным лазерного сенсора [1–20]. В работах [4–6, 8] предложен эффективный способ навигации цехового транспортного робота по данным 2D-лазерного сенсора, который в процессе движения периодически формирует в полярной системе координат 2D-дальномерные изображения — множество попавших в зону обзора точек внешней среды:

$$D = \{ \langle d_i, \alpha_i \rangle, i = 1, 2, \dots, n, \}$$

где d_i и α_i — измеренная дальность и угол сканирования по азимуту для i -го измерения; n — число точек в изображении.

Зона обзора в данном случае представляет собой плоский сектор, параллельный плоскости перемещений. Для каждой пары со-

седних изображений вычисляются приращения трех координат (двух линейных и одной угловой — курса), полностью определяющие положение робота в плоскости перемещений. Для вычисления искомых приращений координат использовался алгоритм экстремальной навигации, в основу которого положен поиск глобального минимума функционала, представляющего собой разность двух дальномерных изображений на множестве возможных приращений координат. Для корректной работы данного алгоритма необходимо выполнение следующих условий: не пустое пересечение зон обзора рассматриваемой пары дальномерных изображений и пригодность геометрии внешней среды для методов экстремальной навигации [6, 8]. Количественные оценки данных условий определяются характеристиками функционала для данной рабочей зоны (интервал унимодальности, выраженность экстремума) и характеристиками используемого лазерного сенсора (сектор обзора, подробность и точность измерений). Поиск глобального минимума функционала выполнялся в два этапа. Сначала путем перебора

с максимально допустимым шагом в трехмерном пространстве возможных положений для каждой координаты находились интервалы унимодальности в локальной области глобального минимума функционала, а затем прямым поиском — его глобальный минимум. Данный способ сканирования пространства и алгоритм экстремальной навигации применим только для движения в плоских средах (цеховые условия, помещения, горизонтальная инфраструктура индустриально-городской среды) без перемещения по высоте и колебаний по крену и дифференту, когда обеспечивается условие пересечения плоских горизонтальных секторов обзора 2D-лазерного сенсора. При движении в индустриально-городской среде с перемещением еще и по высоте и колебаниями по крену и дифференту (индустриально-городские среды, подвергшиеся разрушению, лестницы, аппарели, полет БПЛА) необходимо использовать 3D-лазерные сенсоры, формирующие 3D-дальнометрические изображения. В этих условиях эффективно себя показали алгоритмы, основанные на выделении в 3D-изображениях плоских объектов (стен, потолков, дорог и т. д.), которыми изобилуют урбанизированные среды, и использовании их для решения навигационной задачи [8, 17–20]. В естественной же среде (пересеченная и лесистая местность) плоские объекты отсутствуют, и для видеонавигации наиболее подходящим является описанный выше метод экстремальной навигации, но с решением полной навигационной задачи (вычисление трех линейных и трех угловых координат). Однако данная задача не является тривиальной, так как первый этап — этап поиска интервала унимодальности в локальной области глобального минимума функционала — связан с недопустимо большим объемом вычислений вследствие шестимерности пространства поиска. Это делает невозможным решение навигационной задачи в реальном времени (в темпе движения). Известные методы, например, основанные на часто используемом "Итерационном алгоритме ближайших точек" (Iterative Closest Points — ICP) [3, 12, 14], требуют выполнения на каждой итерации трудоемкой операции поиска ближайших точек, что также затрудняет решение задачи в реальном времени, особенно для больших 3D-изображений, формируемых современными сенсорами. Поэтому востребованы методы и программно-алгоритмические средства, решающие шестимерную задачу экстремальной навигации в реальном времени.

Полная навигационная задача и вычисление функционала разности 3D-дальнометрических изображений

Рассмотрим условия применения метода экстремальной навигации для движения с изменением всех шести координат с использованием данных 3D-лазерного сенсора. Данные сенсоры в большинстве случаев формируют 3D-дальнометрические изображения, представляющие собой множество точек внешней среды, попавших в телесный угол обзора, в сферической системе координат:

$$\mathbf{D} = \{ \langle d_{ij}, \alpha_i, \beta_j \rangle \}, i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m,$$

где d_{ij} — дальность ij -го измерения; α_i, β_j — углы сканирования по азимуту и возвышению; i, j — номера дискретных значений углов сканирования; n, m — число дискретных значений углов сканирования.

Рассмотрим следующую задачу экстремальной навигации:

$$\text{Дано: } \mathbf{D}_1 = \{ \langle d_{1i,j}, \alpha_{1i,j}, \beta_{1i,j} \rangle \} \text{ и } \mathbf{D}_2 = \{ \langle d_{2i,j}, \alpha_{2i,j}, \beta_{2i,j} \rangle \}, i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m,$$

где $\mathbf{D}_1$ и $\mathbf{D}_2$ — 3D-дальнометрические изображения внешней среды, сформированные соответственно в первом и во втором положениях сенсора (робота).

Требуется: найти $\Delta_{1,2} = \langle \Delta X_{12}, \Delta Y_{12}, \Delta Z_{12}, \Delta \gamma_{12}, \Delta \theta_{12}, \Delta \phi_{12} \rangle$ — вектор линейных и угловых перемещений робота из первого положения во второе в системе координат, связанной с первым положением.

Для корректной постановки задачи также необходимо выполнение следующих условий-ограничений [6, 8]:

- 1) не пустое достаточное пересечение зон обзора сенсора в первом и во втором положениях при снятии дальнометрических изображений;
- 2) достаточная точность и подробность дальнометрических изображений;
- 3) геометрическая пригодность внешней среды.

Решение задачи экстремальной навигации в данном случае заключается в поиске такого значения вектора $\Delta_{1,2}$, при котором дальнометрические изображения $\mathbf{D}_1$ и $\mathbf{D}_2$ максимально хорошо совмещаются по области их пересечения, так как это происходит как раз при искомом значении вектора $\Delta_{1,2}$. Поиск значения вектора $\Delta_{1,2}$, при котором дальнометрические изображения $\mathbf{D}_1$ и $\mathbf{D}_2$ максимально хорошо совмещаются по области их пересечения, сводится к задаче оптимизации, т. е. к задаче поиска глобального

оптимума соответствующего функционала на множестве всех возможных значений вектора $\Delta_{1,2}$. Сформулируем правила вычисления такого функционала $\Delta D_{12}(\Delta_{1,2})$ — функционала разности двух изображений $\mathbf{D}_1$ и $\mathbf{D}_2$ на множестве возможных значений вектора $\Delta_{1,2}$ (рис. 1).

Возьмем произвольное i, j -е измерение $\langle d_{2i,j}, \alpha_{2i,j}, \beta_{2i,j} \rangle$ из $\mathbf{D}_2$ и выполним следующие преобразования при условии, что сенсор переместился в соответствии с произвольным вектором $\Delta_{1,2}$ (не обязательно совпадающим с искомым):

$$\begin{pmatrix} x_1(i, j) \\ y_1(i, j) \\ z_1(i, j) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta X_{12} \\ \Delta Y_{12} \\ \Delta Z_{12} \end{pmatrix} + \mathbf{A}_{xyz}(\Delta\gamma_{12}, \Delta\theta_{12}, \Delta\varphi_{12}) \begin{pmatrix} x_2(i, j) \\ y_2(i, j) \\ z_2(i, j) \end{pmatrix}.$$

Здесь

$$\begin{pmatrix} x_2(i, j) \\ y_2(i, j) \\ z_2(i, j) \end{pmatrix} — \text{вектор } i, j\text{-го измерения из } \mathbf{D}_2$$

(вектор $\overline{O_2C_2}$ на рис. 1), преобразованный из сферической системы координат в декартову систему $O_2X_2Y_2Z_2$, связанную с сенсором во втором положении;

$\mathbf{A}_{xyz}(\Delta\gamma_{12}, \Delta\theta_{12}, \Delta\varphi_{12})$ — обобщенная матрица поворотов вокруг основных осей на углы поворота по дифференту $\Delta\gamma$, крену $\Delta\theta$ и курсу $\Delta\varphi$;

$$\begin{pmatrix} \Delta X_{12} \\ \Delta Y_{12} \\ \Delta Z_{12} \end{pmatrix} — \text{вектор линейного смещения из}$$

первого положения во второе в системе координат $O_1X_1Y_1Z_1$, связанной с первым положением сенсора;

$$\begin{pmatrix} x_1(i, j) \\ y_1(i, j) \\ z_1(i, j) \end{pmatrix} — \text{координаты } i, j\text{-го измерения из}$$

$\mathbf{D}_2$, преобразованные в систему координат $O_1X_1Y_1Z_1$ (вектор $\overline{O_1C_2}$ на рис. 1).

Зная вектор $\overline{O_1C_2}$, можно вычислить соответствующие ему углы сканирования по азимуту и возвышению в $\mathbf{D}_1$ (на рис. 1 оптическая ось сенсора совпадает с осью O_1Y_1 , являющейся центром телесного угла обзора):

$$\alpha_1(i, j) = \begin{cases} \arctg\left(\frac{Y_1(i, j)}{X_1(i, j)}\right), & \text{если } X_1(i, j) \geq 0; \\ \pi + \arctg\left(\frac{Y_1(i, j)}{X_1(i, j)}\right), & \text{если } X_1(i, j) < 0; \end{cases}$$

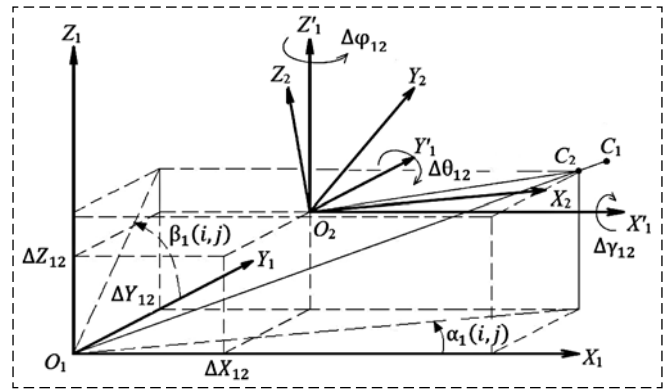


Рис. 1. Алгоритм вычисления функционала разности двух 3D-изображений

Fig. 1. Algorithm for calculating the difference functional of two 3D images

$$\beta_1(i, j) = \arctg\left(\frac{Z_1(i, j)}{\sqrt{X_1^2(i, j) + Y_1^2(i, j)}}\right).$$

Если $\alpha_1(i, j)$ и $\beta_1(i, j)$ принадлежат сектору обзора сенсора, то для данных углов сканирования (с учетом дискретности сканирования) существует соответствующее измерение $d_1(\alpha_1(i, j), \beta_1(i, j))$ в $\mathbf{D}_1$ (на рис. 1 — вектор $\overline{O_1C_1}$). Модуль разницы длины вектора $\overline{O_1C_2}$ и соответствующего ему по направлению измерения из $\mathbf{D}_1$

$$\Delta d_{ij} = |\sqrt{X_1^2(i, j) + Y_1^2(i, j) + Z_1^2(i, j)} - d_1(\alpha_1(i, j), \beta_1(i, j))|$$

назовем i, j -й элементарной разностью двух дальнометрических изображений $\mathbf{D}_1$ и $\mathbf{D}_2$ для данного значения вектора перемещения-поворота Δ_2 . Тогда значение функционала при данном значении вектора перемещения-поворота Δ_2 будет равно усредненной сумме всех элементарных разностей, а формула вычисления функционала будет иметь следующий вид:

$$\Delta D_{12}(\Delta_{1,2}) = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \Delta d_{i,j}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m c_{i,j}},$$

где $c_{i,j} \in \{0, 1\}$ ($c_{i,j} = 1$, если для i, j -го измерения из $\mathbf{D}_2$ существует соответствующее измерение $d_1(\alpha_1(i, j), \beta_2(i, j))$ из $\mathbf{D}_1$ и $c_{i,j} = 0$ — в противном случае).

Так как сумма $\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m c_{i,j}$ равна числу измерений из $\mathbf{D}_2$, которые пересекаются с измерениями из $\mathbf{D}_1$ при данном Δ_2 , то функционал $\Delta D_{12}(\Delta_{1,2})$ является средним значением элементарных раз-

ностей двух дальнометрических изображений D_1 и D_2 на множестве всех возможных значений вектора $\Delta_{1,2}$. Очевидно, что глобальный минимум такого функционала находится в точке решения, и рассматриваемая навигационная задача сведена к задаче оптимизации [21].

Для выбора метода решения и определения условий, при которых данная задача может быть решена в реальном времени, исследуем форму функционала в области решения для сред с различной геометрией.

Исследование формы функционала разности 3D-дальнометрических изображений

Для проведения экспериментальных исследований разработаны и созданы программно-аппаратные средства, состоящие из 3D-лазерного сенсора, сопряженного с компьютером с соответствующим прикладным программным обеспечением. В качестве 3D-лазерного сенсора были использованы 2D-лазерный сенсор Нокую UTM-30LX на опорно-поворотном устройстве и камера глубины Asus Xtion PRO [22].

Исследования проводили в различных средах: в помещениях, где преобладает линейная геометрия, в городской среде, объединяющей объекты с линейной и нелинейной геометрией (рис. 2, см. третью сторону обложки) и в естественной среде (пересеченная и лесистая местности), где преобладает нелинейная геометрия.

Для исследования формы функционала в области решения можно использовать функционал саморазличия (аналог автокорреляционной функции — дальнометрическое изображение сдвигается относительно самого себя). Одномерные сечения шестимерного функционала саморазличия для каждой переменной при фиксации в точке решения остальных пяти для приведенной выше сцены показаны на рис. 3 (см. третью сторону обложки).

Как видно из рис. 3, функционал разности дальнометрических изображений для типичного городского ландшафта имеет ярко выраженный минимум в точке решения, что гарантирует прямое решение задачи оптимизации при попадании в интервал унимодальности вокруг точки решения. Для других внешних сред (помещения, естественная среда) выводы аналогичны, хотя могут быть и исключения, например, когда среда представляет собой ровную плоскость (городскую площадь, дорогу) или несколько параллельных друг другу плоскостей (длинный коридор с ровными стенами). В этих случаях функционал имеет форму типа "овра-

га" равной глубины и не имеет единственного глобального минимума, однако любой из них однозначно определяет часть искомых координат, а остальные связаны линейной зависимостью [13–16] (например, для горизонтальной площадки однозначно определяются высота, крен и дифферент, а в длинном коридоре однозначно определяются все координаты, кроме горизонтальных ΔX_{12} и ΔY_{12} , значения которых связаны линейной зависимостью).

Для исследуемой сцены интервалы унимодальности (на рис. 3, см. третью сторону обложки, показаны интервалы унимодальности $I_{\Delta Z}$ и $I_{\Delta \gamma}$ для переменных ΔZ и $\Delta \gamma$) будут следующие:

$$\begin{aligned} -0,6 < \Delta X < 0,6 \text{ м}; & -0,6 < \Delta Y < 0,6 \text{ м}; \\ -0,35 < \Delta Z < 0,35 \text{ м}; & -25^\circ < \Delta \gamma < 25^\circ; \\ -30^\circ < \Delta \theta < 30^\circ; & -30^\circ < \Delta \varphi < 30^\circ. \end{aligned}$$

В отличие от одномерных сечений построение двумерных сечений функционала в точке решения для двух переменных при фиксации остальных четырех позволяет более полно исследовать функционал (рис. 4, см. третью сторону обложки).

На рис. 4, а приведено двумерное сечение (варьируются координаты ΔZ_{12} и ΔX_{12}) функционала в точке решения при смещении сенсора во второе положение по координате ΔZ_{12} (по высоте на 20 см), а на рис. 4, б — двумерное сечение (варьируются координаты $\Delta \gamma_{12}$ и $\Delta \theta_{12}$) функционала в точке решения при смещении сенсора во второе положение по координате $\Delta \gamma_{12}$ (по дифференту на -10°) для приведенной на рис. 2 (см. третью сторону обложки) сцены.

Реализация метода экстремальной навигации по 3D-дальнометрическим изображениям

Знание интервалов унимодальности по каждой координате для данной среды и скоростей (линейных и угловых) объекта управления позволяет выбрать такую частоту съема 3D-изображений, чтобы перемещение по каждой координате между двумя соседними съемами не превышало половину интервала унимодальности (при невозможности достижения такой частоты съема изображений необходимо снижать скорости движения). Соблюдение данного условия гарантирует возможность прямого поиска глобального минимума функционала из начала координат области его определения (нулевое смещение по всем шести координатам).

Таблица 1
Table 1

Результаты вычислений
Calculation results

Координата	ΔX_{12} , см	ΔY_{12} , см	ΔZ_{12} , см	$\Delta \gamma_{12}$, °	$\Delta \theta_{12}$, °	$\Delta \varphi_{12}$, °
Выполненное смещение	–33	4	–2	0	0	–19
Вычисленное смещение	–32,29	3,55	–1,94	–0,28	0,12	–19,51
Ошибка	0,71	–0,45	0,06	–0,28	0,12	–0,51

Для прямого поиска глобального минимума функционала $\Delta D_{12}(\Delta_{1,2})$ использовались градиентные методы и метод покоординатного спуска с выбором интервалов поиска пропорцией золотого сечения, которые позволили для используемых сенсоров решать задачу в реальном времени на доступных бортовых вычислителях. Результат работы в реальной среде созданных алгоритмических и программно-аппаратных средств приведен в табл. 1. Время вычислений на компьютере с процессором Intel Core i7-9700K составило 0,21 с.

На рис. 5 (см. четвертую сторону обложки) в системе координат, связанной с первым положением сенсора, приведены объединенное облако точек обоих изображений и положения сенсора в моменты съема изображений. Другими словами, это и есть результат решения так называемой SLAM-задачи.

Одномерные сечения функционала $\Delta D_{12}(\Delta_{1,2})$ в точке решения для рассматриваемого примера приведены на рис. 6 (см. четвертую сторону обложки). Как видно из данного рисунка, начало поиска из точки, соответствующей нулевому вектору приращений координат (пересечение осью $0\Delta D_{12}$ одномерных сечений функционала), гарантирует прямой спуск в глобальный минимум по всем координатам.

Способы уменьшения ошибки
при экстремальной навигации

Хотя ошибка вычислений по каждой координате является знакопеременной, суммарная ошибка растет с ростом циклов навигации. Сбрасывание суммарной ошибки обеспечивает использование метода опорных изображений, предложенного в работах [5, 6, 8], который применим только для заранее исследованных сред, когда имеется банк изображений внешней среды с известными координатами точек их съема. Для неизвестных заранее сред снижение суммарной ошибки может дать модификация данного метода, если в качестве опорного брать более "старое" изображение, имеющее с текущим изображением непустое пересечение зон обзора. Смещение между положениями сенсора при формировании опорного и текущего изображений может быть значительно больше интервала унимодальности, но выполненное сначала вычисление координат по последовательности соседних изображений гарантирует попадание в интервал унимодальности вокруг точки глобального минимума функционала разности опорного и текущего изображений и обеспечивает тем самым прямое нахождение глобального минимума. Выполнение описанной процедуры позволяет обнулить суммарную ошибку, которая пропорциональна числу снятых изображений между опорным и текущим изображениями, и заменить ее на ошибку одного цикла навигации по опорному и текущему изображениям. Критерием выбора более "старого" изображения в качестве опорного является достаточная площадь пересечения зон обзора (число общих точек двух анализируемых изображений) и значение глобального минимума функционала различия изображений, которое растет с уменьшением площади пересечения

Таблица 2
Table 2

Результаты вычислений
Calculation results

Смещение	Координата (ошибка)					
	$\Delta X_{12} (\delta_x)$, см	$\Delta Y_{12} (\delta_y)$, см	$\Delta Z_{12} (\delta_z)$, см	$\Delta \gamma_{12} (\delta_\gamma)$, °	$\Delta \theta_{12} (\delta_\theta)$, °	$\Delta \varphi_{12} (\delta_\varphi)$, °
Выполненное смещение в пятое положение	–85,15	53,43	4	0	0	–60
Вычисленное по пяти изображениям смещение в пятое положение	–87,24 (–2,09)	52,08 (–1,35)	1,43 (–2,57)	–0,40 (–0,40)	0,51 (0,51)	–60,99 (–0,99)
Уточненное по первому изображению смещение в пятое положение	–86,08 (–0,93)	53,64 (0,21)	4,14 (0,14)	–0,18 (–0,18)	0,25 (0,25)	–59,34 (0,66)

изображений и косвенно характеризует ошибку данного цикла экстремальной навигации.

На рис. 7 (см. четвертую сторону обложки) и в табл. 2 приведен результат решения SLAM-задачи при снятии и обработке в процессе движения последовательности пяти 3D-изображений.

В первой строке табл. 2 приведен вектор выполненного смещения из первого положения в пятое, во второй строке — результаты четырех циклов обработки пяти изображений (1-2, 2-3, 3-4, 4-5) при вычислении координат в пятом положении, в третьей строке — результаты уточнения координат пятого положения при использовании первого изображения в качестве опорного. Сравнение ошибок решения задачи навигации во второй и третьей строках подтверждает эффективность использования предложенной модификации метода опорных изображений.

Заключение

Предложенный вариант экстремальной навигации обеспечивает решение полной навигационной задачи по данным современных 3D-сенсоров в реальном времени. Использование модификации метода опорных изображений позволяет снизить суммарную ошибку навигации, растущую пропорционально числу циклов решения задачи навигации, до значений, обеспечивающих автономное функционирование транспортных роботов и БПЛА в заранее не подготовленных и неизвестных средах. Эффективность предложенных алгоритмических и разработанных программно-аппаратных средств экстремальной навигации подтверждается результатами натурных экспериментов, проведенными в реальных условиях различных сред.

Список литературы

1. Каляев А. В., Носков В. П., Чернухин Ю. В., Каляев И. А. Однородные управляющие структуры адаптивных роботов. М.: Наука, 1990. 147 с.
2. Besl P. J., McKay Neil D. A Method for Registration of 3-D Shapes // IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence. 1992. Vol. 14, N. 2. P. 239—256.
3. Zhang Zhengyou. Iterative point matching for registration of free-form curves and surfaces // International Journal of Computer Vision. 1994. Vol. 13, N. 12. P. 119—152.
4. Носков В. П., Носков А. В. Система экстремальной навигации цехового транспортного робота // Сб. научн. тр. Искусственный интеллект в технических системах. М.: Гос. ИФТП. 1998. С. 136—144.
5. Лакота Н. А., Носков В. П., Рубцов И. В., Лундgren Я.-О. Моор Ф. Опыт использования элементов ис-

кусственного интеллекта в системе управления цехового транспортного робота // Мехатроника. 2000. № 4. С. 44—47.

6. Носков А. В., Носков В. П. Распознавание ориентиров в дальнометрических изображениях // Мобильные роботы и мехатронные системы. М.: Изд-во МГУ, 2001. С. 179—192.

7. Mitra N., Gelfand N., Pottmann H., Guibas L. J. Registration of Point Cloud Data from a Geometric Optimization Perspective // Proceedings of the 2004 Eurographics/ACM SIGGRAPH symposium on Geometry processing. 2004. P. 22—31.

8. Носков В. П., Носков А. В. Навигация мобильных роботов по дальнометрическим изображениям // Мехатроника, автоматизация, управление. 2005. № 12. С. 16—21.

9. Носков В. П., Рубцов И. В. Опыт решения задачи автономного управления движением мобильных роботов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2005. № 12. С. 21—24.

10. Носков В. П., Носков А. В. Светолокационная СТЗ в системе навигации автономных мобильных робототехнических комплексов // Известия ТРТУ. 2006. № 3. С. 184—185.

11. Носков А. В., Рубцов И. В., Романов А. Ю. Формирование объединенной модели внешней среды на основе информации видеокамеры и дальномера. // Мехатроника, автоматизация, управление. 2007. № 8. С. 2—5.

12. Nüchter A., Lingemann K., Hertzberg J., Surmann H. 6D SLAM — 3D Mapping Outdoor Environments // Journal of Field Robotics. September 2007. Vol. 24, N. 8—9. P. 699—722.

13. Segal A., Haehnel D., Thrun S. Generalized-ICP // Proc. of Robotics: Science and Systems. RSS. 2009.

14. Pomerleau F., Colas F., Siegwart R., Magnenat S. Comparing ICP Variants on Real-World Data Sets // Autonomous Robots. April 2013. Vol. 34, N. 3. P. 133—14.

15. Bylow E., Sturm J., Kerl C., Kahl F., Cremers D. Real-Time Camera Tracking and 3D Reconstruction Using Signed Distance Functions // Proceedings of "Robotics: Science and Systems". Berlin, Germany. 2013. Vol. 9.

16. Загоруйко С. Н., Казьмин В. Н., Носков В. П. Навигация БПЛА и 3D-реконструкция внешней среды по данным бортовой СТЗ // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 8. С. 62—68.

17. Казьмин В. Н., Носков В. П. Выделение геометрических и семантических объектов в дальнометрических изображениях для навигации роботов и реконструкции внешней среды // Известия ЮФУ. Технические науки. 2015. № 10 (171). С. 71—83.

18. Носков В. П., Киселев И. О. Трехмерный вариант метода Хафа в реконструкции внешней среды и навигации // Мехатроника, автоматизация, управление. № 8. 2018. С. 552—560.

19. Носков В. П., Киселев И. О. Выделение плоских объектов в линейно структурированных 3D-изображениях // Робототехника и техническая кибернетика. 2018. № 2(19). С. 31—38.

20. Носков В. П., Киселев И. О. Использование текстуры линейных объектов для построения модели внешней среды и навигации // Мехатроника, автоматизация, управление. 2019. Т. 20, № 8. С. 490—497.

21. Захарова Е. М., Минашина И. К. Обзор методов многомерной оптимизации // Информационные процессы. 2014. Т. 14, № 3. С. 259—261.

22. URL: https://www.asus.com/ru/3D-sensor/Xtion_PRO_LIVE/specifications/

Extreme 3D Image Navigation in Mobile Robotics

V. P. Noskov, noskov_mstu@mail.ru, D. V. Gubernatorov, gubernatorovdaniil@gmail.com,
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation

Corresponding author: Noskov Vladimir P., PhD. Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005,
Russian Federation, e-mail: noskov_mstu@mail.ru

Accepted on July 27, 2021

Abstract

The actual problem of determining all six coordinates of the current position of a mobile robot (unmanned aerial vehicle) from 3D-range-finding images (point clouds) generated by an onboard 3D laser sensor when moving (flying) in an unknown environment is considered. An extreme navigation algorithm based on using multidimensional optimization methods is proposed. The rules for calculating the difference between 3D images of the external environment used for optimization of the functional are described. The form of the functional of the difference of 3D images for different environments (premises, industrial-urban environment, rugged and wooded areas) has been investigated. Requirements for the characteristics of the sensor and the geometry of the external environment are formulated, the fulfillment of which ensures the correct formulation and solution of the problem of extreme navigation. The optimal methods of scanning the surrounding space are described and the conditions are substantiated, the fulfillment of which ensures the solution of the navigation problem by the proposed algorithm in real time (at the rate of movement) when processing 3D images formed by modern 3D laser sensors. In particular, the dependence between the frequency of formation of 3D images and the angular and linear velocities of motion is described, which ensures that the functional of the difference of 3D images falls into the multidimensional interval of unimodality, which guarantees a direct search of global minimum in real time. Various methods of direct search for the global minimum of the functional are tested and the fastest for the case under consideration are selected. The accuracy of solving the navigation problem is estimated and a method is proposed to reduce the accumulated error, based on using an older 3D image for correcting the calculated value of the current coordinates, which has an intersection of the view area with the current view area. The proposed method, which is a modification of the reference image method, allows reduce the total error, which grows in proportion to the number of cycles of solving the extreme navigation problem, to values that ensure the autonomous functioning of transport robots and UAVs in previously unprepared and unknown environments. The effectiveness of the proposed algorithmic and developed software and hardware for extreme navigation is confirmed by field experiments carried out in real conditions of various environments.

Keywords: laser sensor, 3D range-finding images, extreme navigation, multidimensional optimization problem

For citation:

Noskov V. P., Gubernatorov D. V. Extreme 3D Image Navigation in Mobile Robotics, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2021, vol. 22, no. 11, pp. 594–600.

DOI: 10.17587/mau.22.594-600

References

1. Kalyaev A. V., Noskov V. P., Chernuhin Yu. V., Kalyaev I. A. Homogeneous control structures of adaptive robots, Moscow, Nauka, 1990, p. 147 (in Russian).
2. Besl P. J., McKay Neil D. A Method for Registration of 3-D Shapes, *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 1992, vol. 14, no. 2, pp.239–256.
3. Zhang Zhengyou. Iterative point matching for registration of free-form curves and surfaces, *International Journal of Computer Vision*, 1994, 13 (12), pp.119–152.
4. Noskov V. P., Noskov A. V. Extreme navigation system of a workshop transport robot, *Sb. nauchn. tr. Iskusstvennyy intellekt v tekhnicheskikh sistemah*, 1998, pp. 136–144 (in Russian).
5. Lakota N. A., Noskov V. P., Rubtsov I. V., Lundgren Ya.-O., Moor F. Experience of using elements of artificial intelligence in the control system of a workshop transport robot, *Mekhatronika*, 2000, no. 4, pp. 44–47 (in Russian).
6. Noskov A. V., Noskov V. P. Recognition of landmarks in ranging images, *Mobil'nye roboty i mekhatronnye sistemy*, Moscow, Publishing house of MGU, 2001, pp. 179–192 (in Russian).
7. Mitra N., Gelfand N., Pottmann H., Guibas L. J. Registration of Point Cloud Data from a Geometric Optimization Perspective, *Proceedings of the 2004 Eurographics/ACM SIGGRAPH symposium on Geometry processing*, 2004, pp. 22–31.
8. Noskov V. P., Noskov A. V. Navigation of mobile robots by ranging images, *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2005, no. 12, pp. 16–21 (in Russian).
9. Noskov V. P., Rubtsov I. V. Experience in solving the problem of autonomous motion control of mobile robots, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2005, no. 12, pp. 21–24 (in Russian).
10. Noskov V. P., Noskov A. V. Light-locating STV in the navigation system of autonomous mobile robotic systems, *Izvestiya TRTU*, 2006, no. 3, pp. 184–185 (in Russian).
11. Noskov A. V., Rubtsov I. V., Romanov A. Yu. Environment fusion model on basis of data from videocamera and range scanner, *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2007, no. 8, pp. 2–5 (in Russian).
12. Nüchter A., Lingemann K., Hertzberg J., Surmann H. 6D SLAM — 3D Mapping Outdoor Environments, *Journal of Field Robotics*, September 2007, vol. 24, no. 8–9, pp. 699–722.
13. Segal A., Haehnel D., Thrun S. Generalized-ICP, *Proc. of Robotics: Science and Systems*, RSS, 2009.
14. Pomerleau F., Colas F., Siegwart R., Magnenat S. Comparing ICP Variants on Real-World Data Sets, *Autonomous Robots*, April 2013, vol. 34, no. 3, pp. 133–14.
15. Bylow E., Sturm J., Kahl F., Cremers D. Real-Time Camera Tracking and 3D Reconstruction Using Signed Distance Functions, *Proceedings of "Robotics: Science and Systems"*, Berlin, Germany, 2013, vol. 9.
16. Zagoruyko S. N., Kaz'min V. N., Noskov V. P. UAV navigation and 3D-reconstruction of the external environment according to the onboard STV, *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2014, no. 8, pp. 62–68 (in Russian).
17. Kaz'min V. N., Noskov V. P. Detecting geometric and semantic objects in range image for robot navigation and environment reconstruction, *Izvestiya YUFU. Tekhnicheskie nauki*, 2015, no. 10 (171), pp. 71–83 (in Russian).
18. Noskov V. P., Kiselev I. O. A Three-Dimensional Version of the Hough Method in the Reconstruction of the External Environment and Navigation, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2018, vol. 19, no. 8, pp. 552–560 (in Russian).
19. Noskov V. P., Kiselev I. O. Selection of plane objects in linear-structured 3d-images, *Robototekhnika i Tekhnicheskaya Kibernetika*, 2018, no. 2(19), pp. 31–38 (in Russian).
20. Noskov V. P., Kiselev I. O. Using Texture of Linear Objects for Build Environments Model and Navigations, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2019, vol. 20, no. 8, pp. 490–497 (in Russian).
21. Zaharova E. M., Minashina I. K. Review of multidimensional optimization techniques, *Informacionnye Processy*, 2014, vol. 14, no. 3, pp. 259–261 (in Russian).
22. Available at: https://www.asus.com/ru/3D-sensor/Xtion_PRO_LIVE/specifications/

А. С. Самойлова, магистр, sas15m206@student.bmstu.ru,
С. А. Воротников, канд. тех. наук, доц., vorotn@bmstu.ru,
Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)

Система управления шагающим роботом, адаптивным к изменению кинематической схемы

В последнее время в робототехнике получили широкое распространение шагающие мобильные роботы (ШМР) различного назначения. Особенно актуально их использование в задачах экстремальной робототехники, а именно: для помощи при проведении поисково-спасательных операций; перемещения грузов по сильно пересеченной местности; построения карт. Данные роботы также служат для исследования и описания частично или полностью недетерминированного рабочего пространства, а также обследования территорий, опасных для жизни человека. Одним из важнейших требований к таким ШМР является робастность их систем управления, при которой обеспечивается сохранение работоспособности ШМР как при изменении характеристик опорной поверхности, так и при более серьезных проблемах, в частности связанных с потерей управляемости или повреждением опорной конечности (ОК). При создании системы управления ШМР авторами предлагается использовать принципы генетического программирования, позволяющие адаптировать робот к возможным изменениям его кинематической схемы, а также к характеристикам опорной поверхности, по которой он передвигается. Данный подход не требует сильных вычислительных мощностей и строгой формальной классификации возможных повреждений ШМР. В статье рассмотрены два основных режима управления ШМР: штатный, который соответствует исправной кинематической схеме, и аварийный, при котором один или несколько приводов ОК повреждены или потеряли управляемость. В качестве примера предложена структура системы управления ШМР, кинематическая схема которого частично разрушается в процессе движения. Разработан способ управления таким роботом, основанный на использовании генетического алгоритма совместно с автоматом Мили. Проведено моделирование режимов перемещения ШМР с шестью ОК в программе V-REP для двух случаев повреждения: конечность отсутствует и конечность перестала функционировать. Представлены результаты моделирования аварийных походок для этих конфигураций ШМР. Показана эффективность предложенного метода в случае повреждения кинематической схемы ШМР. Выполнено сравнение результатов работы генетического алгоритма для ШМР, имеющего повреждение, со штатным алгоритмом управления.

Ключевые слова: ШМР, ОК, гексапод, штатный режим, аварийный режим, аварийная походка, генетический алгоритм, автомат Мили, эффективность походки

Введение

В последнее время в области экстремальной робототехники все чаще возникает необходимость использования различных шагающих мобильных роботов (ШМР), предназначенных для участия в поисково-спасательных операциях при ликвидации техногенных катастроф, аварий и других чрезвычайных ситуаций, где требуется провести обследование территории, опасной для человека [1, 2]. Сопутствующими задачами при этом часто являются передвижение по пересеченной местности с заранее неизвестными препятствиями, изучение рельефа поверхности, построение карты и др. [3].

При построении системы управления ШМР важным условием является достижение высокой производительности алгоритмов движения с учетом обеспечения надежности их работы. Рабочая среда данного типа робота является недетерминированной [4]. При этом сам робот и его система управления должны сохранять работоспособность при изменении типа поверхности и ее свойств, а также при более значительных проблемах, вызванных,

например, повреждением конструкции опорных конечностей (ОК) [5]. Заметим, что данные проблемы могут быть связаны как с потерей работоспособности отдельного привода конечности, так и с потерей управления всей ОК или даже несколькими конечностями. Большинство алгоритмов управления ШМР, у которых возникают повреждения опорно-двигательного аппарата в процессе движения, основаны на анализе этих повреждений и выборе соответствующего типа походки из априорно заданных [6]. Однако данный подход требует наличия большого числа специализированных датчиков для определения типа повреждения. Также необходимо заранее определить алгоритмы действий ШМР в различных экстренных ситуациях, а в некоторых случаях требуется вмешательство человека-оператора в процесс управления походкой робота.

В ряде публикаций также описаны методы управления ШМР в случае возникновения повреждений одной из ОК. Так, в работе [6] предложено создавать "карты эффективности" способа передвижения. Поврежденный робот выбирает один из априорных способов движения,

тестирует его и обновляет эффективность данного способа на "карте эффективности". Данный алгоритм повторяется до тех пор, пока предложенный авторами критерий успеха не достигает 90 %, после чего выбранный способ движения становится рабочим. Недостатком подхода является отсутствие контроля топологии ШМР в случае возникновения повреждения. Поэтому он становится неэффективным не только при серьезном повреждении конструкции ШМР, но и при возникновении на пути движения робота труднопроходимых препятствий.

Использование методов искусственного интеллекта и машинного обучения также является перспективным подходом для решения данного типа задач. Так, в статье [7] приведены результаты синтеза способа движения ШМР с помощью нейросети, параметры которой настраивались генетическим алгоритмом. Авторы показали способность генетического алгоритма обучить систему управления роботом высокоэффективному способу передвижения. Однако подобное решение также не позволяет учитывать изменение топологии ШМР в случае аварии. Кроме того, длительность настройки алгоритма оказывается недопустимой для реализации качественного управления роботом в условиях слабо детерминированной среды. Также для выполнения обучения нейросети требуется большой объем экспериментальных данных для каждого типа повреждения ШМР.

В статье [8] рассмотрен способ управления шестиногим ШМР, основанный на алгоритме "проб и ошибок" (*Reset-free Trial-and-Error Algorithm*), позволяющем адаптироваться к возможным неисправностям исполнительных устройств робота, таким как потеря ОК или повреждение двигателя. Предложенный алгоритм не требует вмешательства человека при возникновении внештатных ситуаций, связанных с повреждениями робота во время его движения. Выбор компенсационного способа движения осуществляется с помощью метода поиска Монте-Карло в дереве решений. Однако и этот подход не гарантирует нахождения наилучшего способа передвижения для поврежденного робота, так как поиск осуществляется среди априорно-заданных методов для исходной модели робота, не имеющего повреждений.

Таким образом, для всех рассмотренных подходов общим является требование обязательной формализации и классификации всех возмож-

ных неисправностей ШМР, которое в реальных условиях оказывается недостижимым.

Одним из путей решения указанной проблемы является построение управления ШМР на основе принципов эволюционного (генетического) программирования [9]. Этот подход не требует наличия экспериментальной базы данных и сильных вычислительных мощностей, а также позволяет решать задачи оптимизации, для которых неэффективны стандартные градиентные методы [10]. В этом случае робот оснащается средствами контроля движения, оценивающими эффективность этого процесса, логическим аппаратом для выбора способа передвижения (походки) и использует генетический алгоритм, осуществляющий "тонкую настройку" выбранной походки [7]. С помощью данных средств ШМР должен сохранить способность перемещаться в заданном направлении даже в случае частичного разрушения его опорно-двигательного аппарата.

Конструкция и система управления ШМР

Целью исследования, представленного в данной статье, является разработка системы управления ШМР, которая способна формировать устойчивое движение робота при частичном нарушении его топологии, связанным с локальным разрушением конструкции или выходом из строя части приводов исполнительной системы.

В качестве кинематической схемы выбрана топология гексапода — ШМР с шестью ОК (рис. 1). Эта схема позволяет реализовать успешное перемещение робота даже при повреждении половины ОК [11]. Движение каждой ОК реали-

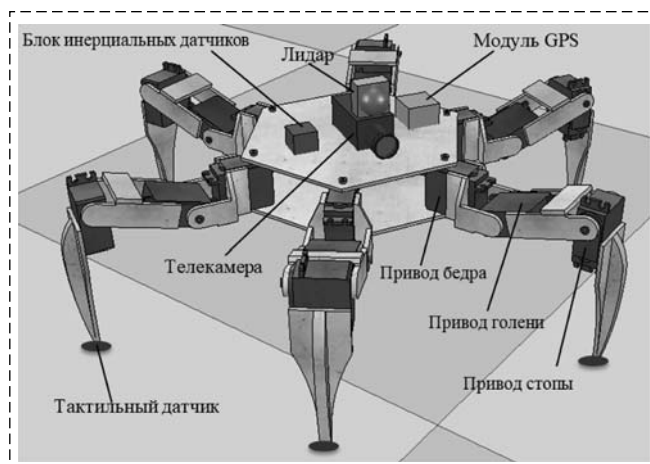


Рис. 1. Кинематическая модель ШМР

Fig. 1. WMR kinematic model

зуется с помощью трех приводов, установленных в бедренном суставе, голени и стопе, соответственно. Каждый выполненный шаг робота фиксируется с помощью тактильных датчиков, размещенных в основании каждой стопы ОК.

Систему управления ШМР предлагается строить по иерархическому принципу: *уровень управления движением* контролирует обработку входных воздействий на приводы ОК, используя данные, получаемые от энкодеров, а *уровень управления поведением* задает движение к целевой точке и анализирует состояние робота в процессе движения с помощью *блока контроля движения* (рис. 2). Важно отметить, что если при движении ШМР возникают проблемы, препятствующие его перемещению в пространстве, этот блок должен модифицировать закон управления ШМР таким образом, чтобы восстановить движение к целевой точке.

Информационный модуль с помощью *сенсорного контроллера* анализирует параметры ориентации ШМР в окружающей среде (на основе данных от *блока инерциальных датчиков* и *модуля GPS* [12]), а также препятствия на пути движения (посредством *лидара* и *телекамеры* [13]).

Транспортный модуль осуществляет непосредственное перемещение ШМР в рабочем пространстве с помощью шести ОК, входящих в состав *ходовой части*.

Важную задачу по контролю работоспособности ОК выполняет *блок анализа коллизий*.

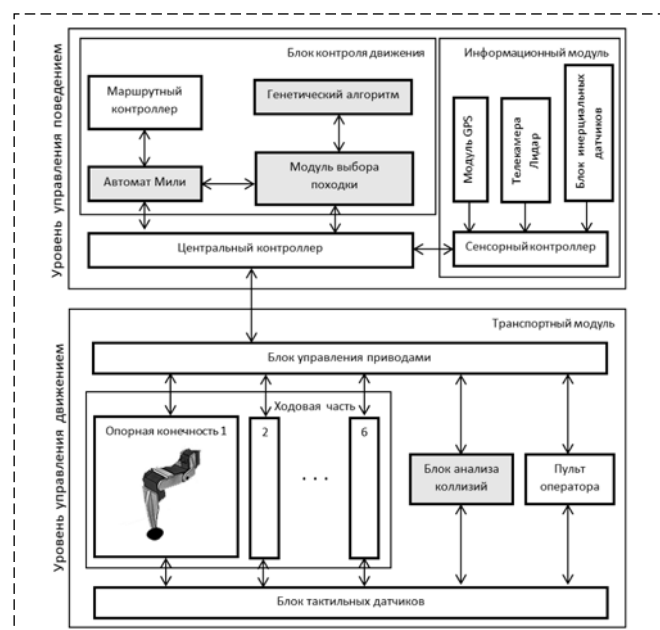


Рис. 2. Структура системы управления ШМР

Fig. 2. Structure of the WMR control system

В него поступают сигналы от энкодеров приводов и тактильных датчиков, установленных на стопе каждой ОК [14]. Отсутствие сигнала от одного из этих датчиков указывает на наличие повреждения конечности ШМР [15], которое фиксируется в *блоке управления приводами*.

Анализ состояния робота, формирование маршрута движения и выбор способа перемещения проводятся в *центральной контроллере*, который формирует команды управления ходовой частью ШМР на основе информации, получаемой от блока анализа коллизий и блока контроля движения.

В случае если подобное решение получить не удастся, управление передается на *пульт оператора* для реализации ручного режима управления [16].

Блок контроля движения содержит следующие основные модули:

- *маршрутный контроллер* — для построения маршрута движения к целевой точке;
- *модуль выбора походки* — для принятия решения о способе перемещения с помощью соответствующего типа априорно заданных походок;
- *автомат Мили* — для выбора режима движения в зависимости от текущего состояния робота;
- *генетический алгоритм* — для настройки походки ШМР с частично нарушенной топологией.

Способ и алгоритм управления ШМР

При разработке способа управления ШМР были рассмотрены два режима движения: *штатный*, соответствующий исправной кинематической схеме, и *аварийный* (с нарушением топологии ШМР), при котором какие-либо из опорных конечностей являются частично или полностью неработоспособными. Способы движения в штатном режиме для гексапода хорошо известны: походка тройками, волновая и пульсирующая походки [17]; они в данной статье не рассматриваются.

О возникновении аварийной ситуации в процессе движения могут свидетельствовать следующие два обстоятельства:

- 1) отсутствуют сигналы обратной связи от тактильных датчиков соответствующих ОК;
- 2) обрываются сигналы от энкодеров приводов бедра и/или голени.

Для движения в аварийном режиме дополнительно введем два варианта походки:

- *движение с прихрамыванием* — ШМР потерял одну или несколько конечностей;
- *движение с волочением конечности* — один или несколько приводов ШМР перестали функционировать, и конечность потеряла управляемость.

Управление движением ШМР в штатном и аварийном режимах осуществляется с помощью конечного автомата Мили (рис. 3), на вход которого поступает информация от блока анализа коллизий и модуля выбора походки (см. рис. 2).

Блок анализа коллизий контролирует прохождение сигналов от тактильных датчиков и энкодеров ШМР и при возникновении аварийной ситуации определяет ее тип (состояние x_1 на рис. 3). Возможны два варианта потери работоспособности ОК: полная или частичная. Первый возникает, если в процессе движения робота отказывает одна или несколько ОК целиком, вплоть до механической потери ее звеньев, второй — при выходе из строя одного из приводов ОК. В первом случае ОК считается потерянной, а движение ШМР — "прихрамывающим", во втором — неуправляемой, и движение — "с волочением конечности".

Модуль выбора походки содержит алгоритмы реализации трех штатных и двух аварийных походок, причем настройка последних выполняется с помощью генетического алгоритма.

Эффективность каждой походки (состояние x_6 на рис. 3) оценивается коэффициентом E , который сравнивает текущую скорость движения V относительно максимальной скорости

движения $V_{\max}^{\text{шт}}$ ШМР, доступной в штатном режиме [18]:

$$E = \frac{V}{V_{\max}^{\text{шт}}} \cdot 100 \%. \quad (1)$$

Рассмотрим работу автомата Мили подробнее. Если движение ШМР осуществляется в штатном режиме, то используется один из базовых режимов управления (состояние x_3). При возникновении аварийной ситуации (о ней сигнализирует блок анализа коллизий) автомат Мили выбирает одну из аварийных походок (состояние x_2) и запускает генетический алгоритм (состояния x_4 и x_5) для настройки соответствующего способа передвижения.

Генетический алгоритм

При работе генетического алгоритма выполняется процесс поиска наилучшего способа передвижения для текущей конфигурации ШМР. После завершения работы данного алгоритма формируется модифицированный вариант походки робота. Затем автомат Мили тестирует возможность движения ШМР с помощью данной походки и анализирует эффективность ее применения (состояние x_6 на рис. 3). Если модифицированная походка является эффективной (состояние x_7), то она сохраняется в модуле выбора походки, и ШМР продолжает движение с ее помощью. В противном случае автомат Мили запускает работу генетического алгоритма повторно (состояние x_2).

В общем случае генетический алгоритм представляет собой алгоритм поиска решения, основанный на принципах генетики и естественного отбора [8]. Главной задачей алгоритма является нахождение минимума целевой функции $f(p)$. Для данной задачи выберем целевую функцию в виде:

$$f(p) = (\sqrt{\mu_1 \Delta x^2 + \mu_2 \Delta y^2 + \mu_3 \Delta z^2})^{-1}, \quad (2)$$

где Δx , Δy и Δz — перемещения ШМР вдоль соответствующих осей с помощью походки, синтезируемой генетическим алгоритмом; μ_1 , μ_2 и μ_3 — весовые коэффициенты. Значения этих коэффициентов выбираются из диапазона [0...1] в зависимости от того, по какой поверхности перемещается робот: горизонтальной или наклонной.

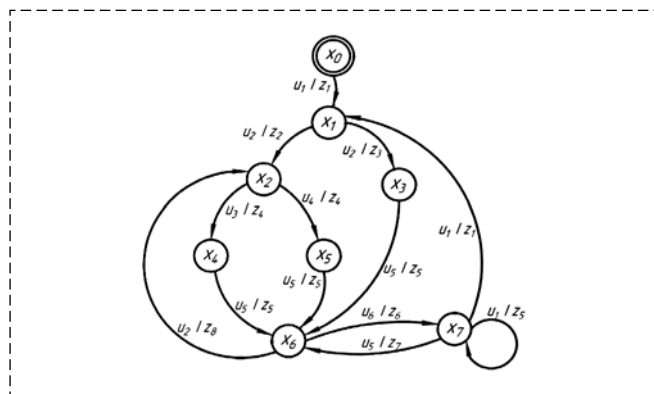


Рис. 3. Конечный автомат Мили (x_i — состояние, u_j , z_k — управляющий и выходной сигналы, соответственно)

Fig. 3. Mealy finite-state machine (x_i — state, u_j , z_k — transition and output functions respectively)

Ядром генетического алгоритма является взаимодействие популяции генов, где каждый ген состоит из равного числа компонент — хромосом. В рамках данной задачи ген представлен в виде вектора $G = [q_1, q_2, q_3]$, который состоит из трех хромосом, определяющих углы поворота соответствующих приводов ОК. Так, например, при потере ШМР одной из ОК сигналы на ее приводы не подаются.

В общем виде работу генетического алгоритма можно представить как последовательность следующих действий:

1. Создается популяция из $N = 10$ генов с начальным значением хромосом, соответствующим имеющейся аварийной походке ШМР, причем значения углов поворота шарниров лежат в пределах, допустимых конструктивными особенностями данного робота.

2. Вычисляется значение целевой функции $f(\rho)$ для генов популяции по формуле (2).

3. Гены сортируются в порядке возрастания значений их целевой функции.

4. Формируется новое поколение генов как комбинация значений хромосом первых $m = 4$ генов ($m < N$). В создании нового поколения участвуют хромосомы только генов с наилучшим значением функции $f(\rho)$, полученных на предыдущем шаге. Гены с номерами от $m + 1$ до N отбрасываются как самые неподходящие, т. е. с худшим значением функции $f(\rho)$. При этом получаемые комбинации хромосом могут быть произвольными.

5. Для $k = 5$ ($k < N$) последних генов выполняется процедура мутации. Она заключается в добавлении случайных значений к хромо-

сомам гена. При этом каждый последующий ген мутирует больше, чем предыдущий; это необходимо для их обновления. С помощью мутации исключается попадание решения в локальный минимум. Далее решение возвращается ко второму шагу.

Данный алгоритм может быть завершен при достижении необходимого значения целевой функции $f(\rho)$ или после выполнения заданного числа итераций.

Представленный выше алгоритм выполняется для всех шести ОК ШМР. В результате его работы определяются необходимые углы поворота для всех приводов, и, тем самым, модифицируется выбранный тип аварийной походки. Вообще говоря, этот алгоритм может быть запущен для настройки не аварийной, а базовой походки, но в таком случае процесс настройки займет больше времени.

Среда разработки и ограничения модели

Разработку и исследование модели ШМР проводили в среде V-REP, позволяющей учитывать физические свойства предметов и тел, их массоскоростные параметры и силу трения, генерировать показания датчиков, а также анализировать движение модели на виртуальной сцене [19].

Каждая опорная конечность ШМР в модели представлялась тремя составными частями, соединенными шарнирами друг с другом и с корпусом (рис. 4, а). В модели можно изменять число ОК (рис. 4, б) или отключать приводы соответствующих конечностей (рис. 4, в).

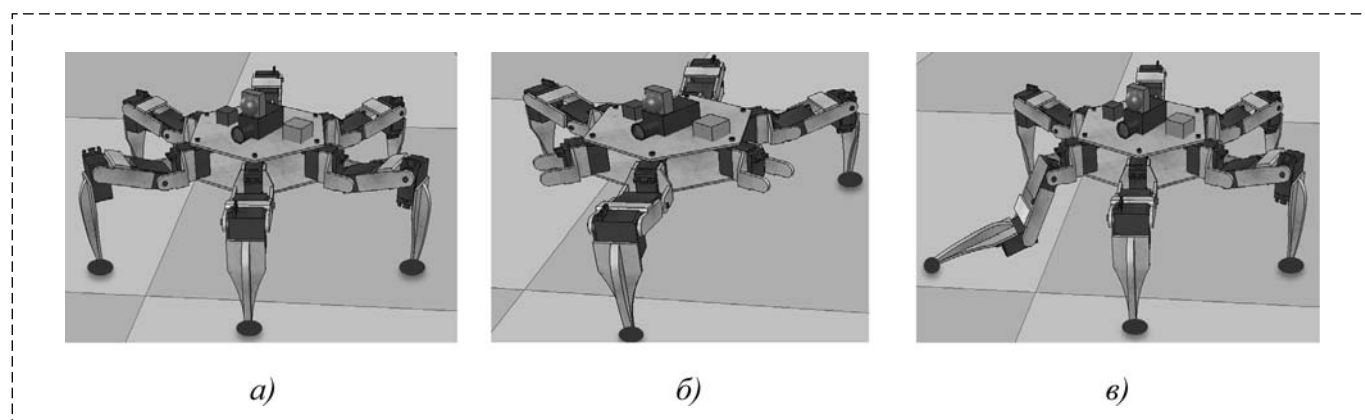
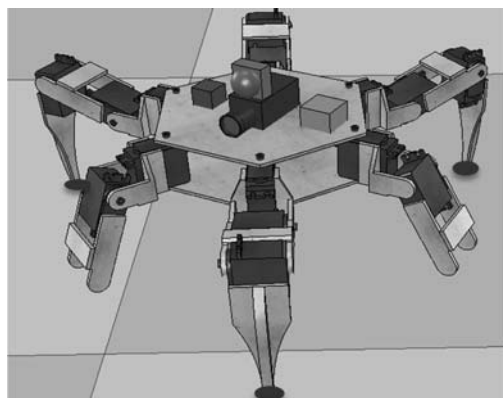


Рис. 4. Модель ШМР-гексапода в программе V-REP:

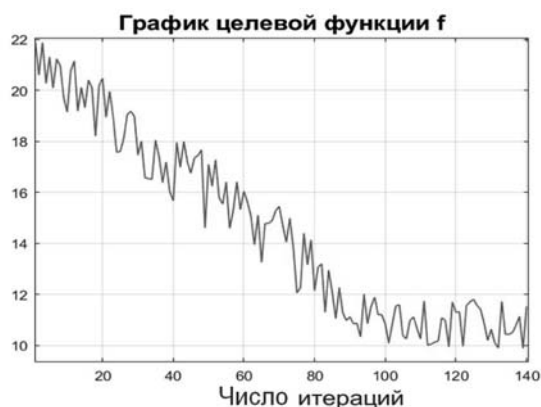
а — движение в штатном режиме; б — движение с прихрамыванием; в — движение с волочением конечности

Fig. 4. The WMR-hexapod model in the V-REP program:

а — movement in standard mode; б — limping movement; в — dragging movement



а)



б)

Рис. 5. Движение ШМР с прихрамыванием:

а — модель повреждения робота; б — график целевой функции

Fig. 5. Limping movement of WMR:

а — robot damage model; б — objective function plot

Данные изменения качественно отразятся на поведении ШМР на виртуальной сцене [20].

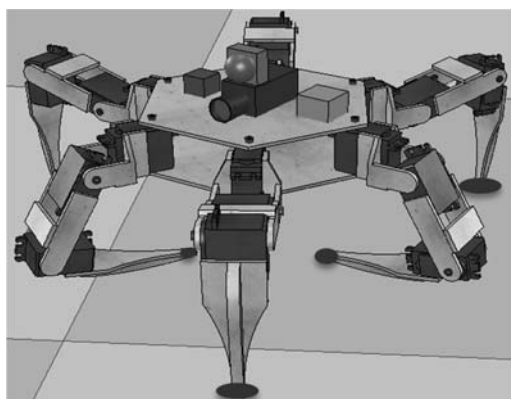
При моделировании движения ШМР вводилось допущение, что опорная поверхность является гладкой, расположенной в горизонтальной плоскости, а по своим физическим свойствам соответствует плотному грунту.

Результаты моделирования

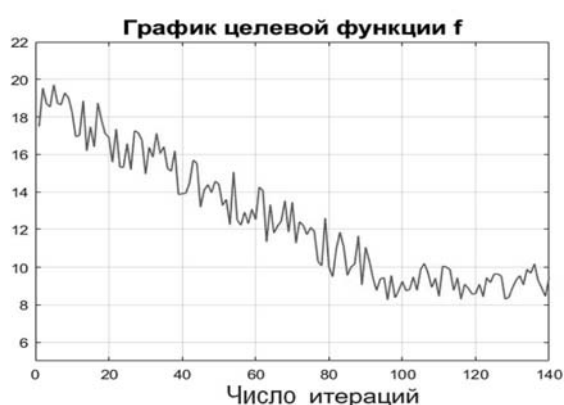
При моделировании были рассмотрены два типа аварийного движения: с прихрамыванием и волочением конечности.

Движение с прихрамыванием. Для конкретности исследовали модель ШМР, у которого отсутствовали стопы двух не соседних между собой ОК (рис. 5, а). При этом у робота появлялась возможность в процессе движения опираться на голень соответствующей ноги.

Для данной конфигурации ШМР применен генетический алгоритм, результирующий график целевой функции которого изображен на рис. 5, б. Для данной реализации генетического алгоритма было задано выполнение 140 итераций, при этом по графику (рис. 5, б) видно, что минимум целевой функции достигается уже примерно на 100-й итерации.



а)



б)

Рис. 6. Движение ШМР с волочением конечности:

а — модель повреждения робота; б — график целевой функции

Fig. 6. Dragging movement of WMR:

а — robot damage model; б — objective function plot

Следовательно, алгоритм успешно выполнил синтез походки для перемещения ШМР, несмотря на наличие у него повреждений [21]. Выбросы на графике свидетельствуют о некорректных значениях, которые были получены на стадии мутации. На следующем шаге алгоритма данный недостаток компенсируется.

После завершения цикла работы генетического алгоритма полученные значения управляющих воздействий приводов использовались для моделирования походки ШМР. Эффективность данной походки E , вычисленная по формуле (1), составила 78 %.

Движение с волочением конечности. Для конкретности была рассмотрена модель ШМР, у которой перестали функционировать приводы голени двух тех же не соседних ОК (рис. 6, а). При этом у робота оставалась возможность в процессе движения опираться на стопу соответствующей ноги.

В результате применения генетического алгоритма был получен график целевой функции для поврежденного ШМР, показанный на рис. 6, б. Так же, как и ранее, определялись значения управляющих воздействий приводов, которые использовались для моделирования походки ШМР. При реализации генетического алгоритма, как и ранее, было задано выполнение 140 итераций, причем здесь минимум целевой функции достигался примерно на 95 итерации (рис. 6, б). В данном случае настройка алгоритма произошла быстрее, чем в первом случае, но развиваемая роботом скорость оказалась ниже, вследствие отличия типов повреждений ШМР. Эффективность походки E при этом составила 74 %.

Таким образом, при использовании генетического алгоритма, реализованного для двух типов аварийных походок, достигается скорость движения ШМР более $0,7V_{\max}^{\text{шт}}$, что гарантирует успешное перемещение поврежденной модели ШМР на виртуальной сцене.

Заключение

В статье разработана структура системы управления ШМР с шестью ОК и предложен способ управления на основе конечного автомата Мили. При повреждениях робота, ведущих к частичному изменению его кинематической схемы, предложено использовать аварийные походки, а их настройку проводить с помощью ге-

нетического алгоритма. Выполнено исследование двух типов аварийных походок: "движение с прихрамыванием" и "движение с волочением конечности" в среде моделирования V-REP.

Полученные графики целевых функций для рассмотренных примеров аварийных походок имеют похожий вид и сходятся к минимальному значению быстрее, чем за 100 итераций. В результате этого скорость движения ШМР на виртуальной сцене после настройки походки достигает порядка $0,7V_{\max}^{\text{шт}}$.

Результаты проведенных исследований продемонстрировали возможности генетического алгоритма настраивать систему управления ШМР таким образом, что он становится адаптивным к некоторому изменению своей кинематической схемы, включая даже частичное разрушение собственной конструкции.

Было показано, что совместное использование конечного автомата Мили и генетического алгоритма является эффективным способом управления ШМР в экстремальных режимах эксплуатации и повышает робастность его системы управления в целом.

Список литературы

1. Bartsch S. Development, control, and empirical evaluation of the six-legged robot SpaceClimber designed for extraterrestrial crater exploration // Artificial intelligence. 2014. Vol. 28. P. 127—131. DOI:10.1007/s13218-014-0299-y.
2. Назарова А. В., Мэйсинь Ч. Проблемы использования робототехнических систем в операциях спасения при землетрясениях // Робототехника и техническая кибернетика. 2018. № 3(20). С. 31—38. DOI 10.31776/RTSJ.6303.
3. Roennau A., Heppner G., Nowickiand M., Dillmann R. LAURON V: A Versatile Six-Legged Walking Robot with Advanced Maneuverability // International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. 2014. P. 82—87. DOI:10.1109/AIM.2014.6878051.
4. Юревич Е. И. Основы робототехники. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 416 с.
5. Bongard J., Zykov V., Lipson H. Resilient machines through continuous self-modeling // ScienceRobotics. 2006. 314 (5802), P. 1118—1121. DOI: 10.1126/science.1133687.
6. Cully A., Clune J. Robots that can adapt like animals // Nature. 2015. 521 (7553), P. 503—507. DOI:10.1038/nature14422.
7. Мунасыпов Р. А., Москвичев С. С. Методика синтеза стратегии движения автономного мобильного робота на основе эволюционных процессов // Вестник УГАТУ. 2012. Т. 16, № 3. С. 56—62.
8. Chatzilygeroudis K., Vassiliades V., Mouret J. Reset-free Trial-and-Error Learning for Robot Damage Recovery // Robotics and Autonomous Systems. 2018. Vol. 100. P. 236—250. DOI:10.1016/j.robot.2017.11.010.
9. Бураков М. В. Генетический алгоритм: теория и практика: учеб. пособие. СПб.: ГУАП, 2008. 164 с.
10. Гасников А. В. Современные численные методы оптимизации. Метод универсального градиентного спуска: Учеб. пособие. М.: МФТИ, 2018. 291 с.
11. Ramdya P., Thandiackal R., Cherney R. Climbing favours the tripod gait over alternative faster insect gaits // Nature Communications. 2017. 8 (1), 14494. DOI: 10.1038/ncomms14494.

12. Михайлова В. В., Соловьева Т. Н., Попов В. П. Моделирование кинематики шагающего робота // Информационно-управляющие системы. 2015. № 6 (79). С. 50–56.
13. Перов А. И., Харисов В. Н. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования. М.: Радиотехника, 2010. 800 с.
14. Гречишкин М. Н. Система технического зрения для обнаружения движения в видеопотоке // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2015. № 9. С. 66–70.
15. Воротников С. А. Информационные устройства робототехнических систем: Учеб. пособие / Под ред. С. Л. Зенкевича, А. С. Ющенко. М: Изд. МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. 383 с.
16. Антонов А. В., Воротников С. А., Выборнов Н. А. Система управления трехпорным колесно-шагающим роботом // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2016. № 2 (34). С. 58–69.
17. Ющенко А. С. Маршрутизация движения мобильного робота в условиях неопределенности // Мехатроника, автоматизация, управление. 2004. № 1. С. 31–38.
18. Egrazo A. S. Terrain Adaptive Gaits for Hexapod Robots // Electronic Engineer in Automation and Control. 2014. V. 10. P. 513–528.
19. Бжихатлов И. А. Моделирование робототехнических систем в программе V-REP: учеб. пособие. СПб.: Университет ИТМО, 2018. 59 с.
20. Eric Rohmer, Surya P. N. Singh. CoppeliaSim (formerly V-REP): a versatile and scalable robot simulation framework // Proc. of The International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). 2013. URL: https://www.coppeliarobotics.com/coppeliaSim_v-rep_iros2013.pdf, 6 p.
21. Самойлова А. С., Груничев П. А., Воротников С. А. Система управления шагающим мобильным роботом с использованием генетического алгоритма // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. № 10. С. 153–162.

The Walking Robot Control System that is Adaptive to Changes in the Kinematics

A. S. Samoylova, sas15m206@student.bmstu.ru, S. A. Vorotnikov, vorotn@bmstu.ru,
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation

Corresponding author: Vorotnikov S. A., Cand. Sc.
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation,
e-mail: vorotn@bmstu.ru

Accepted on July 27, 2021

Abstract

The walking mobile robots (WMR) have recently become widely popular in robotics. They are especially useful in the extreme cases: search and rescue operations; cargo delivery over highly rough terrain; building a map. These robots also serve to explore and describe a partially or completely non-deterministic workspace, as well as to explore areas that are dangerous to human life. One of the main requirements for these WMR is the robustness of its control system. It allows WMR to maintain the operability when the characteristics of the support surface change as well as under more severe conditions, in particular, loss of controllability or damage of the supporting limb (SL). We propose to use the principles of genetic programming to create a WMR control system that allows a robot to adapt to possible changes in its kinematics, as well as to the characteristics of the support surface on which it moves. This approach does not require strong computational power or a strict formal classification of possible damage to the WMR. This article discusses two main WMR control modes: standard, which accord to a serviceable kinematics, and emergency, in which one or more SL drives are damaged or lost controllability. As an example, the structure of the control system of the WMP is proposed, the kinematics of which is partially destroyed in the process of movement. We developed a method for controlling such robot, which is based on the use of a genetic algorithm in conjunction with the Mealy machine. Modeling of modes of movement of WMR with six SL was carried out in the V-REP program for two cases of injury: absent and not functioning limb. We present the results of simulation of emergency gaits for these configurations of WMP and the effectiveness of the proposed method in the case of damage to the kinematic scheme. We also compared the performance of the genetic algorithm for the damaged WMR with the standard control algorithm.

Keywords: WMR, SL, hexapod, standard mode, emergency mode, emergency gait, genetic algorithm, Mealy machine, gait effectiveness

For citation:

Samoylova A. S., Vorotnikov S. A. The Walking Robot Control System that is Adaptive to Changes in the Kinematics, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2021, vol. 22, no. 11, pp. 601–609.

DOI: 10.17587/mau.22.601-609

References

1. Bartsch S. Development, control, and empirical evaluation of the six-legged robot SpaceClimber designed for extraterrestrial crater exploration, *Artificial intelligence*, 2014, vol. 28, pp. 127–131, DOI:10.1007/s13218-014-0299-y.
2. Nazarova A. V., Meixin Zhai. Problems of using robotic systems in earthquake rescue operation, *Robotics and Technical Cybernetics*, 2018, no. 3(20), pp. 31–38. DOI 10.31776/RTSJ.6303.
3. Roennau A., Heppner G., Nowickiand M., Dillmann R. LAURON V: A Versatile Six-Legged Walking Robot with Advanced

Maneuverability, *International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, 2014, pp. 82–87, DOI:10.1109/AIM.2014.6878051.

4. **Yurevich E. I.** Fundamentals of robotics, St. Petersburg, BHV-Petersburg, 2005, 416 p.

5. **Bongard J., Zykov V., Lipson H.** Resilient machines through continuous self-modeling, *ScienceRobotics*, 2006, 314 (5802), pp. 1118–1121. DOI: 10.1126/science.1133687.

6. **Cully A., Clune J.** Robots that can adapt like animals, *Nature*, 2015, 521 (7553), pp. 503–507. DOI: 10.1038/nature14422.

7. **Munasyrov R. A., Moskvichev S. S.** Evolutionary-based synthesis of locomotion strategy of an autonomous mobile robot, *Bulletin UGATU*, 2012, vol. 16, no. 3, pp. 56–62.

8. **Chatzilygeroudis K., Vassiliades V., Mouret J.** Reset-free Trial-and-Error Learning for Robot Damage Recovery, *Robotics and Autonomous Systems*, 2018, vol. 100, pp. 236–250. DOI: 10.1016/j.robot.2017.11.010.

9. **Burakov M. V.** Genetic algorithm: theory and practice, Saint Petersburg, GUAP, 2008, 164 p.

10. **Gasnikov A. V.** Modern numerical optimization methods. The method of universal gradient descent: training manual, Moscow, MIPT, 2018, 291 p.

11. **Ramya P., Thandiackal R., Cherney R.** Climbing favours the tripod gait over alternative faster insect gaits, *Nature Communications*, 2017, 8 (1), 14494. DOI:10.1038/ncomms14494.

12. **Mikhailova V. V., Solovyova T. N., Popov V. P.** Kinematic modeling of a walking machine, *Information and Control Systems*, 2015, no. 6 (79), pp. 50–56.

13. **Perov A. I., Kharisov V. N.** GLONASS. Principles of construction and functioning, Moscow, Radio Engineering, 2010, 800 p.

14. **Grechishkin M. N.** Computer vision system for motion detection in a video stream, *Izvestiya Tula State University. Technical sciences*, 2015, no. 9, pp. 66–70.

15. **Vorotnikov S. A.** Information devices of robotic systems: Study guide, Edited by S. L. Zenkevich, A. S. Yushchenko, Moscow, Publishing house of the Bauman Moscow State Technical University, 2005, 383 p.

16. **Antonov A. V., Vorotnikov S. A., Vybornov N. A.** The control system of a three-point wheel-legged robot, *Caspian Journal: management and high technologies*, 2016, no. 2 (34), pp. 58–69.

17. **Yushchenko A. S.** Routing the movement of a mobile robot in conditions of uncertainty, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2004, no. 1, pp. 31–38.

18. **Erazo A. S.** Terrain Adaptive Gaits for Hexapod Robots, *Electronic Engineer in Automation and Control*, 2014, vol. 10, pp. 513–528.

19. **Brzikhatlov I. A.** Modeling of robotic systems in the V-REP program: training manual, St. Petersburg, ITMO University, 2018, 59 p.

20. **Eric Rohmer, Surya P. N. Singh.** CoppeliaSim (formerly V-REP): a versatile and scalable robot simulation framework, *Proc. of The International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2013, available at: https://www.coppeliarobotics.com/coppeliaSim_v-rep_iros2013.pdf, 6 p.

21. **Samoylova A. S., Grunichev P. A., Vorotnikov S. A.** Control system of a walking mobile robot using a genetic algorithm, *Izvestiya Tula State University. Technical sciences*, 2020, no. 10, pp. 153–162.



9 декабря в Тульском ГУ состоится

Четвертая всероссийская
научно-техническая конференция

МЕХАТРОННЫЕ СИСТЕМЫ (теория и проектирование)

Посвящается

100-летию со дня рождения профессора Б. М. Подчуфарова
и 65-летнему юбилею кафедры "САУ" ТулГУ»

Научная программа конференции

Секция №1. Системы управления техническими объектами.

Секция №2. Автоматические приводы и их элементы.

Секция №3. Интеллектуальные мехатронные системы.

Секция №4. Мехатронные системы в робототехнике.

Секция №5. Мехатронные системы в тренажерных комплексах.

Секция №6. Проблемы проектирования и производства
мехатронных систем и модулей.

Адрес оргкомитета

300012, Тула, пр. Ленина 92, ТулГУ, кафедра "САУ".

Телефон: (4872)35-38-35, E-mail: info@sau.tsu.tula.ru

В. И. Рубцов, канд. техн. наук, доц., rubtsov@mail.ru,
К. Ю. Машков, канд. техн. наук, доц., makon@bmstu.ru,
К. В. Коновалов, ассистент, konovalov_kv@bmstu.ru,

Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)

Многоуровневая система управления интеллектуальным роботом, входящим в состав группы

Рассмотрены вопросы применения группы робототехнических комплексов военного назначения. Современное состояние систем управления одиночных робототехнических комплексов не позволяет решать все задачи, стоящие перед роботом. Проведен анализ способов управления группой роботов в боевых условиях. Обоснована необходимость использования многоуровневой системы управления интеллектуальным боевым роботом. Предложена многоуровневая система управления интеллектуальным роботом. Такая система предполагает возможность управления роботом в одном из четырех режимов: дистанционном, супервизорном, автономном и групповом. Более того, каждый робот в зависимости от внешних условий и своего состояния может находиться в любом режиме управления. Применение данной методики управления показано на примере движения группы роботов с интервалом по фронту. Рассмотрена задача движения ведомых роботов за лидером. При формировании алгоритма управления роботом использовался метод конечных автоматов. Алгоритм управляет движением РТК в различных режимах работы: режиме группового управления и в режиме автономного движения. В режиме группового управления реализована задача "движение за лидером". Для состояния "движение строем" был реализован алгоритм формирования траектории движения ведомых роботов с помощью аппроксимации кривой Безье. Он позволяет построить траекторию для ведомого робота. На основе полученной траектории вычислялись угловая и линейная скорости. В режиме автономного управления решаются две задачи: движение в заданную точку и объезд препятствий. В качестве алгоритма для объезда препятствия был использован алгоритм Vector Field Histogram, который определяет направление движения без препятствий. В основе состояния "Движение в заданную точку" базовым алгоритмом выступил Pure Pursuit как простой и надежный при решении подобных задач. Была разработана компьютерная модель движения группы роботов. Модель реализована в программе MATLAB с использованием библиотек Simulink и Mobile Robotics Simulation Toolbox. Промоделированы несколько разных вариантов движения группы РТК, отличающихся друг от друга начальным расположением роботов и положением препятствий. Проведенное компьютерное моделирование показало работоспособность и эффективность предложенного метода управления РТК.

Ключевые слова: группа РТК, распределение целей, система группового управления, моделирование, многоуровневая система управления

Введение

Современный этап развития военной робототехники характеризуется переходом от разработки экспериментальных образцов наземных робототехнических комплексов военного назначения (РТК ВН) к серийному производству и освоению в войсках различных типов боевых и обеспечивающих образцов РТК [1, 2]. В достаточно короткие сроки высокотехнологичное роботизированное вооружение пройдет путь от применения отдельных образцов до массового производства и применения подразделений РТК. В ближайшее десятилетие наземные РТК ВН будут составлять значительную долю численности вооружения и военной техники сухопутных войск.

Одиночное применение РТК в бою будет скорее исключением, чем правилом. Роботизированное вооружение планируется применять группами однородных, разнородных и разноразрядных РТК.

Несмотря на значительные усилия разработчиков РТК ВН по повышению степени автоном-

ности роботов, режим дистанционного управления еще в течение длительного времени будет оставаться основным. Для управления боевым роботом требуются, как минимум, два человека — оператор движения и оператор вооружения. Учитывая, что эффективность наземных РТК ВН для решения задач сухопутных войск проявляется только при групповом применении и во взаимодействии с другими роботами, для выполнения задач потребуется большое число высококвалифицированных специалистов. Для более плавного перехода от дистанционно управляемых роботов к автономным и далее к групповому управлению предполагается использовать многоуровневую систему управления интеллектуальным роботом [3—5].

Система управления РТК и постановка задачи

Система управления РТК должна учитывать возможность функционирования и управления роботами как в дистанционном режиме, так и в автономном в составе группы. В связи

с этим авторами статей [6—8] было предложено использовать многоуровневую систему управления, которая состоит из четырех уровней:

- 1) дистанционного;
- 2) интеллектуального дистанционного или супервизорного;
- 3) автономного;
- 4) группового.

Каждый уровень увеличивает информативность, которую получает оператор, и в то же время расширяет возможности управления и снижает нагрузку на оператора. При выполнении задания у робота могут возникнуть затруднения, тогда он должен из режима автономного управления переключиться в режим супервизорного и связаться с оператором. При этом робот выключается из работы группы, а когда оператор разрешает сложившуюся ситуацию, тогда он переводит робота в автономный режим, и робот снова включается в группу и может работать или в автономном, или в групповом режиме, решая задачи группы или выполняя задание оператора.

Робот может самостоятельно переключаться в разные режимы, учитывая свое состояние и состояние окружающей среды [9]. На рис. 1 показана система управления интеллектуальным роботом. Она позволяет учитывать внешние обстоятельства и быстро на них реагировать. В случае возникновения внештатной ситуации, например, выхода робота из строя или невозможности

одного из роботов действовать в составе группы, группа перестраивается и продолжает выполнение миссии. Робот, вышедший из строя, переходит в режим дистанционного управления и связывается с оператором, который решает сложившуюся проблему. Таким образом, каждый робот группы может работать в одном из четырех режимов. Такой подход позволяет увеличить вероятность выполнения поставленной задачи [10].

Математическое описание системы управления интеллектуальным роботом

Реализацию данной системы рассмотрим на примере движения группы роботов с интервалом по фронту. Такие задачи наиболее интересны с практической точки зрения [11]. Построение системы выполним на основе теории конечных автоматов. Вначале дадим краткие теоретические основы. Функциональным конечным автоматом $A = [U, X, Z, Exec(), f, h]$ будем называть набор из шести объектов: $U = \{u_1, u_2, \dots, u_r\}$ — множество входных сигналов; $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ — конечное множество состояний; $Z = \{z_1, z_2, \dots, z_r\}$ — множество выходных сигналов; $Exec() = \{exec_1(), exec_2(), \dots, exec_n()\}$ — множество выполняемых действий, соответствующих состоянию автомата; f — функции одношагового перехода в следующее состояние $x(t+1) = f(x(t), u(t))$; h — функции выхода $z(t+1) = h(x(t), u(t))$ (автомат Мили, выходные сигналы которого зависят от состояния автомата и входных сигналов) или $z(t+1) = h(x(t))$ (автомат Мура, выходные сигналы в котором зависят лишь от текущего состояния автомата). Заметим, что в рассматриваемом случае используются асинхронные автоматы, т. е. параметр t характеризует не время, а признак появления на входе автомата сигнала из множества U .

Рассмотрим случай движения группы роботов с интервалом по фронту. Группа состоит из трех роботов, один из них лидер, два ведомых. Лидер располагается посередине.

На рис. 2 представлен разработанный конечный автомат для системы управления интеллекту-

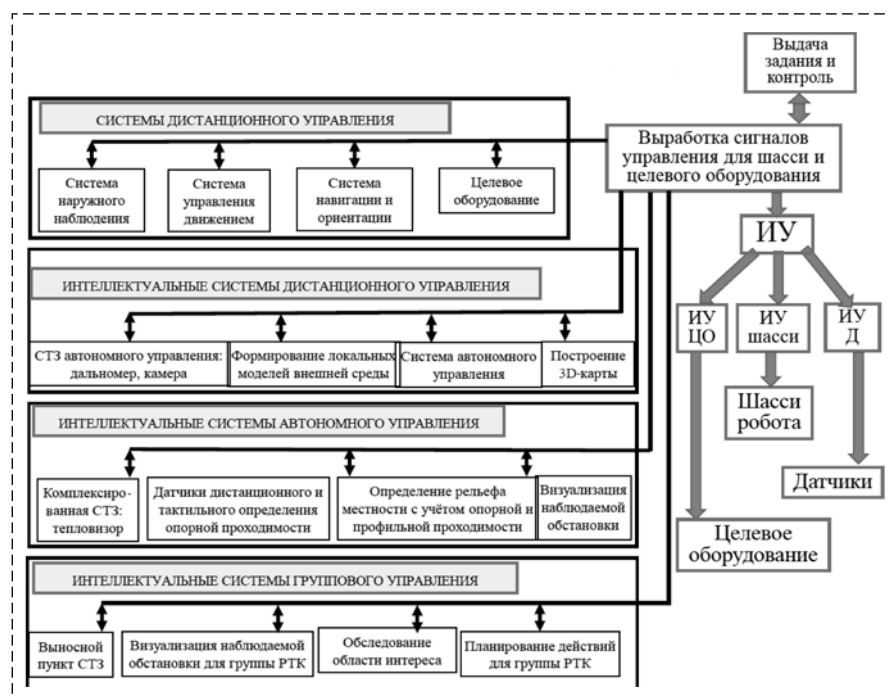


Рис. 1. Система управления интеллектуальным роботом

Fig. 1. Intelligent robot control system

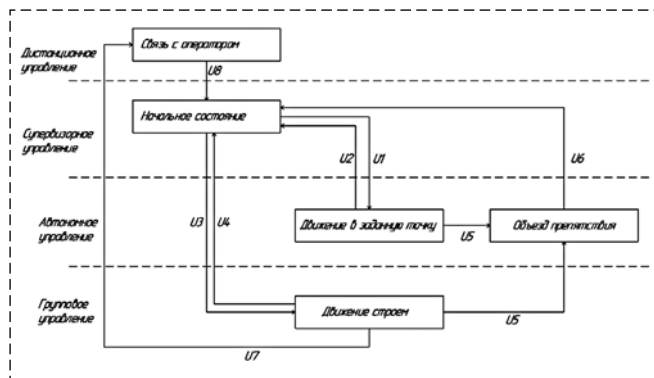


Рис. 2. Автомат управления интеллектуальным роботом
Fig. 2. Automatic control of an intelligent robot

альным роботом. Штриховой линией разделены режимы управления. Видны состояния, которые относятся к каждому из уровней. В режиме группового управления одно состояние — это движение за лидером. В режиме автономного управления два состояния: движение в заданную точку и объезд препятствия.

Множество входных сигналов U : $U1$ — команда движения в заданную точку; $U2$ — робот достиг точки; $U3$ — движение строем, это возможно при условии, когда строй сформирован; $U4$ — выход из группового движения; $U5$ — перед роботом препятствие; $U6$ — робот объехал препятствие; $U7$ — робот потерял лидера; $U8$ — перевод робота в супервизорное управление, эту команду формирует оператор.

Выходными сигналами Z задается, какой именно алгоритм будет управлять роботом. Для движения группы роботов было использовано несколько готовых алгоритмов. В качестве алгоритма для объезда препятствия был использован алгоритм Vector Field Histogram, который определяет направление движения без препятствий. Для состояния "Движение в заданную точку" базовым алгоритмом выступил Pure Pursuit как простой и надежный при решении подобных задач [12].

Для состояния "Движение строем" был реализован алгоритм формирования траектории движения ведомых роботов. В литературе описано большое число разнообразных подходов для решения этой задачи. После проведенного обзора литературы был выбран алгоритм аппроксимации кривой Безье. Он позволяет построить траекторию для ведомого робота [13]. На основе полученной траектории вычислялись угловая и линейная скорости.

Моделирование движения группы роботов

Для доказательства работоспособности предложенной системы управления была разработана компьютерная модель группы роботов. Модель реализована в программе MATLAB с использованием библиотек Simulink и Mobile Robotics Simulation Toolbox [14, 15]. Она состоит из трех роботов дифференциального типа. Габаритные размеры роботов: радиус колеса 0,025 м, радиус робота 0,35 м. Построение группы реализовано со смещением по фронту. В общем случае у оператора есть возможность задать произвольное расположение роботов в группе, главное, чтобы роботы находились в зоне видимости системы технического зрения. Без ограничения общности рассмотрим несколько разных вариантов моделирования, отличающихся друг от друга начальным расположением роботов и положением препятствий.

На рис. 3 представлено моделирование движения группы роботов для первого случая. В начальный момент времени роботы находятся в автономном режиме. Приходит команда построения в колонну, положение робота в колонне определяется оператором, так как это позволяет выстроить колонну, адаптируя к особенностям местности. Далее определяется лидер, как правило, это робот, находящийся впереди, или же он задается оператором. После этого роботы переходят в режим группового управления и движутся за лидером. В случае возникновения препятствия перед одним из роботов этот робот

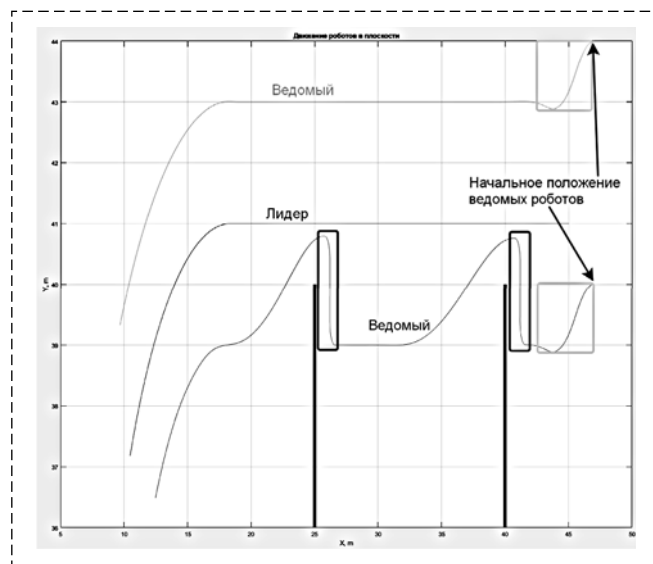


Рис. 3. Траектория движения группы роботов для первого случая

Fig. 3. The trajectory of a group of robots for the first case

переходит в режим автономного управления и объезжает препятствие. Две черные вертикальные линии обозначают препятствие.

Второй случай отличается от первого расположением препятствия. На рис. 4 представлена траектория движения роботов. Видно, что ведомый робот пересекает траекторию движения лидера, но столкновения не происходит, так как лидер уже проехал этот участок, пока ведомый объезжал препятствие.

В третьем случае между ведомым роботом и лидером в процессе движения появляется пре-

пятствие. В таком случае пропадает зона прямой видимости. Ведомый теряет лидера, переходит в режим дистанционного управления и связывается с оператором. В рассматриваемом случае есть два варианта действий: первый — продолжить движение прямо в автономном режиме до окончания препятствия; второй — объехать препятствие и следовать за лидером. В первом варианте после окончания препятствия определить координаты лидера, перейти в режим группового управления и продолжить движение в составе группы. Но в таком случае, если лидер изменит траекторию движения, то ведомый 1 может опять его потерять и снова перейдет в режим дистанционного управления для связи с оператором. Траектория движения роботов представлена на рис. 5. В начальный момент времени ведомый 2 выходит в заданную точку для движения колонной. Это обозначено прямоугольником, рядом с которым находится поясняющая надпись "Режим автономного управления". Горизонтальные линии, к которым подведены сноски "Смена режима управления", показывают моменты переключения ведомого 1 в разные режимы управления.

Опишем второй вариант. Когда ведомый робот 1 теряет из зоны видимости лидера, он связывается с оператором. На рис. 6 этот момент обозначен звездочкой. Оператор, зная окружающую обстановку, задает набор точек, по которым робот объезжает препятствие. Потом оператор переводит робота в режим авто-

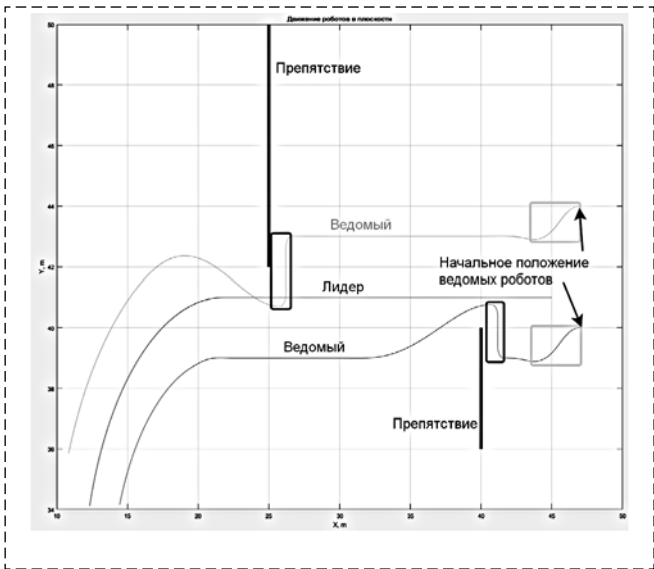


Рис. 4. Траектория движения группы роботов для второго случая
Fig. 4. The trajectory of a group of robots for the second case

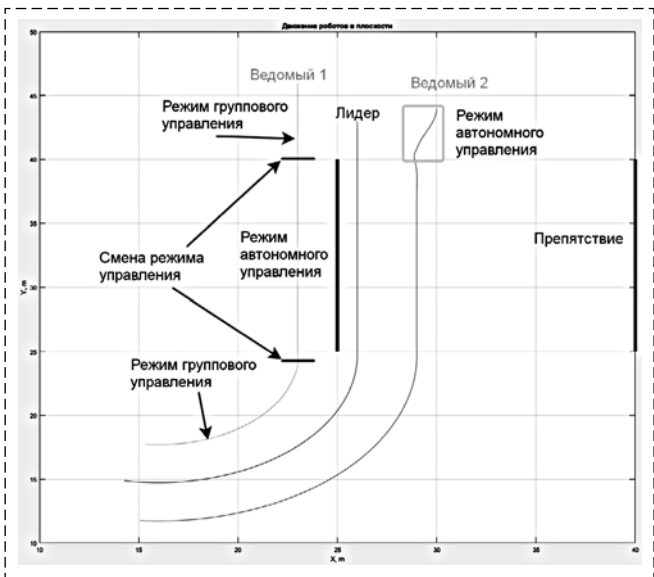


Рис. 5. Траектория движения группы роботов для третьего случая, первый вариант
Fig. 5. The trajectory of the movement of a group of robots for the third case, the first option

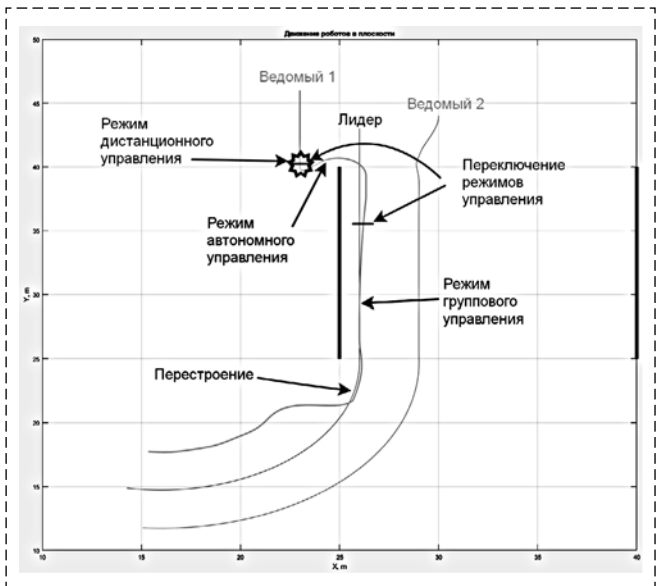


Рис. 6. Траектория движения группы роботов для третьего случая, второй вариант
Fig. 6. The trajectory of the movement of a group of robots for the third case, the second option

номного управления. Далее ведомый 1 находит лидера, переключается в режим группового управления и продолжает движение в составе группы. В таком случае не сохраняется начальная конфигурация строя, но ведомый не теряет из видимости лидера. После преодоления препятствия ведомый 1 перестраивается. На рис. 6 показаны траектории движения роботов и обозначены ключевые моменты.

Заключение

Представлена система управления интеллектуальным роботом. Одним из преимуществ подобной системы является возможность управления существующими в настоящее время наземными РТК в режиме дистанционного управления, а также реализуемое в разрабатываемых РТК движение по опорным точкам, супервизорное или, в перспективе, интеллектуальное управление движением для самостоятельного достижения рубежа применения. Важно, что в каждый момент времени роботы могут находиться в разных режимах работы. Это дает возможность сохранять работоспособность группы независимо от устойчивости связи и выхода из строя одного из РТК, в том числе лидера.

Такая система позволит осуществить более плавный и легкий переход от имеющихся роботов с дистанционным управлением к автономным, а в будущем и к групповому управлению. Проведенное компьютерное моделирование показало работоспособность и эффективность предложенного метода управления РТК.

Список литературы

1. **Каляев И. А., Гайдук А. Р., Капустян С. Г.** Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. М.: Физматлит, 2009.

2. **Михайлов Б. Б., Назарова А. В., Ющенко А. С.** Автономные мобильные роботы — навигация и управление // Известия ЮФУ. Технические науки. 2016. № 2. С. 48—67.
3. **Белоглазов Д. А., Гайдук А. Р.** Групповое управление подвижными объектами в неопределенных средах / Под ред. В. Х. Пшихопова. М.: Физматлит, 2015.
4. **Kamada T., Oikawa K.** AMADEUS: A Mobile, Autonomous Decentralized Utility System for Indoor Transportation // IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation, Leuven, Belgium, May 16—20, 1998. Vol. 4. P. 2229—2236.
5. **Vail D., Veloso M.** Dynamic multi-robot coordination // Multi-Robot Systems: From Swarms to Intelligent Automata / Eds.: A. Schultz, L. Parker, and F. Schneider. Kluwer Academic Publishers, 2003. V. II. P. 87—100.
6. **Назарова А. В., Рыжова Т. П.** Система управления коллективом роботов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 4. С. 45—50.
7. **Fierro R., Das A., Spletzer J.** A Framework and Architecture for Multi-Robot Coordination // Intern. J. of Robotic Research. 2002. Vol. 21(10-11). P. 977—995.
8. **Parker L.** Alliance: An Architecture for Fault Tolerant Multi-Robot Cooperation // IEEE Transactions on Robotics and Automation. 1998. Vol. 14(2). P. 220—240.
9. **Носков В. П., Рубцов В. И., Рубцов И. В.** Математические модели движения и системы технического зрения мобильных робототехнических комплексов: учебное пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2015.
10. **Hladek D., Vascak J., Sincak P.** Multi-robot control system for pursuit-evasion problem // Journal of electrical engineering. 2009. Vol. 60, N. 3. P. 143—148.
11. **Kadhim Olewi, Al-Jarrah R., Roth H., Kazem B.** Integrated Motion Planning and Control for Multi Objectives Optimization and Multi Robots Navigation // IFAC-Papers On Line 48. 2015. Vol. 10. P. 99—104.
12. **Liu Y., Yang J., Zheng Y., Wu Z., Yao M.** Multi-Robot Coordination in Complex Environment with Task and Communication Constraints // In-tern. J. of Advanced Robotic Systems. 2013. Vol. 10. P. 1—14.
13. **Timofeev A. V.** Intelligent Control and Operations Research for Multi-Agent Robot Systems // International Autonomous Systems: Intern. Scientific Issue. Karlsruhe—Ufa: USATU, 1998. P. 119—124.
14. **Rubtsov V. I., Raskatov V. D.** Simulation in MATLAB motion of the mobile robots group when working in the industrial-urban environment (Моделирование в MATLAB движения группы мобильных роботов при работе в индустриально-городской среде) // Cite as: AIP Conference Proceedings 2195, 020015 (2019); <https://doi.org/10.1063/1.5140115>. Published Online: 17 December 2019.
15. **Rubtsov I. V., Rubtsov V. I., Lapshov V. S., Kononov K. V.** Simulation in MATLAB group control when conducting reconnaissance in areas // In AIP Conference Proceedings, 2195. 2019. P. 020009-1—020009-7.

Multi-Level Control System for an Intelligent Robot that is Part of a Group

V. I. Rubtsov, rubtsov@mail.ru, **K. J. Mashkov**, makon@bmstu.ru, **K. V. Kononov**, kononov_kv@bmstu.ru,
Bauman Moscow Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation

Corresponding author: Rubtsov Vasily I., Ph.D., Associate Professor, Bauman Moscow Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation, e-mail: rubtsov@mail.ru

Accepted on July 27, 2021

Abstract

The article is devoted to the application of a group of robotic complexes for military purposes. The current state of control systems of single robotic complexes does not allow solving all the tasks assigned to the robot. The analysis of methods

of controlling a group of robots in combat conditions is carried out. The necessity of using a multi-level control system for an intelligent combat robot is justified. A multi-level control system for an intelligent robot is proposed. Such a system assumes the possibility of controlling the robot in one of four modes: remote, supervisory, autonomous and group. Moreover, each robot, depending on the external conditions and its condition, can be in any control mode. The application of the technique is shown by the example of the movement of a group of robots with an interval along the front. The problem of the movement of slave robots behind the leader is considered. When forming the robot control algorithm, the method of finite automata was used. The algorithm controls the movement of the RTK in various operating modes: group control mode and autonomous movement mode. In the group control mode, the task is implemented: movement for the leader. For the state of "Movement in formation", an algorithm for forming the trajectory of the movement of guided robots was implemented. An algorithm for approximating the Bezier curve was used. It allows you to build a trajectory for the slave robot. On the basis of the obtained trajectory, the angular and linear velocity were calculated. In the autonomous control mode, two tasks are solved: moving to a given point and avoiding obstacles. Vector Field Histogram was used as an algorithm for detouring an obstacle, which determines the direction of movement without obstacles. The state of "Movement to a given point" is based on Pure Pursuit as a simple and reliable algorithm for solving such problems. A computer model of the movement of a group of robots was developed. The model is implemented in the MATLAB program using the Simulink and Mobile Robotics Simulation Toolbox libraries. Several different variants of the movement of the RTK group are modeled, which differ from each other in the initial location of the robots and the position of obstacles. The conducted computer simulation showed the efficiency and effectiveness of the proposed method of RTC control.

Keywords: RTK group; distribution of goals; group control system; modeling; multi-level control system

For citation:

Rubtsov V. I., Mashkov K. J., Kononov K. V. Multi-Level Control System for an Intelligent Robot that is Part of a Group, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2021, vol. 22, no. 11, pp. 610—615.

DOI: 10.17587/mau.22.610-615

References

1. Kalyaev I. A., Gaiduk A. R., Kapustyan S. G. Models and algorithms of collective control in groups of robots, Moscow, Fizmatlit, 2009 (in Russian).
2. Mikhailov B. B., Nazarova A. V., Yushchenko A. S. Autonomous mobile robots — navigation and control, *Izvestiya JuFU. Tehnicheskie nauki*, 2016, no. 2, pp. 48—67 (in Russian).
3. Beloglazov D. A., Gaiduk A. R. Group control of mobile objects in uncertain environments, Ed. V. Kh. Pshikhov. Moscow, Fizmatlit, 2015 (in Russian).
4. Kamada T., Oikawa K. AMADEUS: A Mobile, Autonomous Decentralized Utility System for Indoor Transportation, *IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation*, Leuven, Belgium, May 16—20, 1998, vol. 4, pp. 2229—2236.
5. Vail D., Veloso M. Dynamic multi-robot coordination, *Multi-Robot Systems: From Swarms to Intelligent Automata*, Eds.: A. Schultz, L. Parker, and F. Schneider, Kluwer Academic Publishers, 2003, vol. II, pp. 87—100.
6. Nazarova A. V., Ryzhova T. P. Control system for a group of robots, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2014, no. 4, pp. 45—50 (in Russian).
7. Fierro R., Das A., Spletzer J. A Framework and Architecture for Multi-Robot Coordination, *Intern. J. of Robotic Research*, 2002, vol. 21(10-11), pp. 977—995.
8. Parker L. Alliance: An Architecture for Fault Tolerant Multi-Robot Cooperation, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1998, vol. 14(2), pp. 220—240.
9. Noskov V. P., Rubtsov V. I., Rubtsov I. V. Mathematical models of motion and technical vision systems of mobile robotic

complexes, Moscow, Publishing house of Bauman Moscow State Technical University, 2015 (in Russian).

10. Hladek D., Vascak J., Sincak P. Multi-robot control system for pursuit-evasion problem, *Journal of electrical engineering*, 2009, vol. 60, no. 3, pp. 143—148.

11. Kadhimi Olewi, Al-Jarrah R., Roth H., Kazem B. Integrated Motion Planning and Control for Multi Objectives Optimization and Multi Robots Navigation, *IFAC-PapersOnLine*48, 2015, Vol. 10, pp. 99—104.

12. Liu Y., Yang J., Zheng Y., Wu Z., Yao M. Multi-Robot Coordination in Complex Environment with Task and Communication Constraints, *Intern. J. of Advanced Robotic Systems*, 2013, vol. 10, pp. 1—14.

13. Timofeev A. V. Intelligent Control and Operations Research for Multi-Agent Robot Systems, *International Autonomous Systems: Intern. Scientific Issue*, Karlsruhe—Ufa, USATU, 1998, pp. 119—124.

14. Rubtsov V. I., Raskatov V. D. Simulation in MATLAB motion of the mobile robots group when working in the industrial-urban environment, *Cite as: AIP Conference Proceedings* 2195, 020015 (2019), available at: <https://doi.org/10.1063/1.5140115>, Published Online: 17 December 2019

15. Rubtsov I. V., Rubtsov V. I., Lapshov V. S., Kononov K. V. Simulation in MATLAB group control when conducting reconnaissance in areas, *In AIP Conference Proceedings*, 2195, 2019, pp. 020009-1—020009-7.



15—18 марта 2022 г.

**XXIII конференция молодых ученых
"НАВИГАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ"
Санкт-Петербург, Россия**



В формат конференции включаются обзорные лекции ведущих ученых в области теории и практики построения современных систем навигации и управления движением и доклады участников конференции.



31 мая – 21 июня 2022 г. в Санкт-Петербурге
на базе ОАО "Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»

**состоится конференции:
XXVIII Санкт-Петербургская
Международная конференция
по интегрированным
навигационным системам**



Тематика конференции

- Инерциальные датчики, системы навигации и ориентации
- Интегрированные системы навигации и управления движением
- Глобальные навигационные спутниковые системы
- Средства гравиметрической поддержки навигации

В рамках каждого направления рассматриваются:

- схемы построения и конструктивные особенности
- методы и алгоритмы
- особенности разработки и применения для различных подвижных объектов и условий движения (аэрокосмические, морские, наземные, подземные)
- испытания и метрология.

Контактная информация:

Тел.: +7 (812) 499 82 10 +7 (812) 499 81 57
Факс: +7 (812) 232 33 76 E-mail: icins@eprib.ru

Издательство "НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ"

107076, Москва, Матросская тишина, 23с2

Телефон редакции журнала: **+7(916) 392 21 67**

Технический редактор *Е. В. Конова*. Корректор *М. Ю. Безменова*.

Сдано в набор 26.08.2021. Подписано в печать 11.10.2021. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 8,86. Заказ МН1121. Цена договорная.

Журнал зарегистрирован в Комитете Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций

Свидетельство о регистрации ПИ № 77-11648 от 21.01.02

Учредитель: Издательство "Новые технологии"

Оригинал-макет ООО "Авансед солюшнз". Отпечатано в ООО "Авансед солюшнз".
119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: www.aov.ru