

ИЗВЕСТИЯ

Волгоградского
государственного
технического
университета

ISSN 1990-5297



Серия
Роботы, мехатроника
и робототехнические системы

16+

№ 4 (275)
2023

Главный редактор научного журнала
«Известия Волгоградского государственного технического университета»
академик РАН, профессор, доктор химических наук,
президент Волгоградского государственного технического университета (ВолгГТУ)
И. А. НОВАКОВ

Редакционная коллегия:

Байбурин В. Б., д-р физ.-мат. наук, проф., академик РАЕН, засл. деятель науки РФ,
Саратовский государственный технический университет (г. Саратов, Россия)
Безъязычный В. Ф., д-р техн. наук, проф.,
Рыбинский государственный авиационный технический университет им. П. А. Соловьева (г. Рыбинск, Россия)
Бодров В. Н., д-р, проф., Университет прикладных наук (г. Берлин, Германия)
Бребельс А., PhD, доцент факультета инженерных наук университета г. Левена (г. Левен, Бельгия)
Буренин А. А., чл.-корр. РАН, Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН
(г. Комсомольск-на-Амуре, Россия)
Голованчиков А. Б., д-р. техн. наук, проф. ВолгГТУ
Гринберг Б. А., д-р физ.-мат. наук, Институт физики металлов УрО РАН (г. Екатеринбург, Россия)
Гуревич Л. М., д-р техн. наук, доц. ВолгГТУ
Добрушин Л. Д., д-р техн. наук, Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины (г. Киев, Украина)
Злотин С. Г., д-р хим. наук, проф., Институт органической химии им. Н. Д. Зелинского РАН (г. Москва, Россия)
Иванов А. М., д-р техн. наук, проф.,
Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ, г. Москва, Россия)
Иващенко Н. А., д-р техн. наук, проф., засл. деятель науки РФ, МГТУ им. Н. Э. Баумана (г. Москва, Россия)
Королев А. В., д-р техн. наук, проф., Саратовский государственный технический университет (г. Саратов, Россия)
Кузьмин С. В., д-р техн. наук, проф. ВолгГТУ
Кураев А. А., д-р физ.-мат. наук, проф., Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(БГУИР, г. Минск, Республика Беларусь)
Лысак В. И., академик РАН, засл. деятель науки РФ, д-р техн. наук, проф. ВолгГТУ
Марков В. А., д-р техн. наук, проф., Московский государственный технический университет
(МГТУ) им. Н. Э. Баумана (г. Москва, Россия)
Мертен Клеменс, д-р техн. наук, проф. Universität Stuttgart Institut für Chemische Verfahrenstechnik
(г. Штутгарт, Германия)
Навроцкий А. В., д-р хим. наук, проф. ВолгГТУ
Нижегородцев Р. М., д-р экон. наук, Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН (г. Москва, Россия)
Пай В. В., д-р физ.-мат. наук, Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН (г. Новосибирск, Россия)
Пустовойт В. Н., д-р техн. наук, проф., засл. деятель науки РФ, Донской государственный технический университет
(г. Ростов-на-Дону, Россия)
Русинов В. Л., чл.-корр. РАН, Химико-технологический институт Уральского федерального университета
(ХТИ УрФУ, г. Екатеринбург, Россия)
Рыбин В. В., чл.-корр. РАН, д-р физ.-мат. наук, проф.,
Санкт-Петербургский политехнический университет (г. Санкт-Петербург, Россия)
Трюэль Жан-Луи, д-р экон. наук, проф., Университет «Париж-12», Сорбонна, Франция,
вице-президент Международного клуба экономистов «Круг Кондратьева»
Тхай Куанг Винь, д-р философии, Институт информационных технологий (г. Ханой, Вьетнам)
Федянов Е. А., д-р техн. наук, проф. ВолгГТУ
Фролов В. А., д-р техн. наук, проф., МАТИ – Российский государственный технологический университет
им. К. Э. Циолковского (г. Москва, Россия)
Шаритов В. М., д-р техн. наук, проф., Московский государственный технический университет
(МАМИ, г. Москва, Россия)
Шаховская Л. С., д-р экон. наук, проф. ВолгГТУ
Щербаков М. В., д-р техн. наук, проф. ВолгГТУ

Серия

«РОБОТЫ, МЕХАТРОНИКА
И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ
СИСТЕМЫ»

ИЗВЕСТИЯ



ВОЛГОГРАДСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Журнал входит в перечень утвержденных ВАК РФ изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:

Председатель

Брискин Е. С., д.ф.-м.н., проф.

Горобцов А. С., д.т.н., проф.

Жога В. В., д.ф.-м.н., проф.

Зейдис И., PhD, проф.,

Университет Ильменау
(г. Ильменау, Германия)

Ермолов И. Л., д.т.н., проф. РАН,
ИПМех им. А. Ю. Ишлинского РАН
(г. Москва)

Калинин Я. В., к.т.н., доцент

Капустян С. Г., д.т.н.,
ЮФУ (г. Ростов-на-Дону)

Малолетов А. В., д.ф.-м.н.,
Университет Иннополис
(г. Иннополис, Республика Татарстан)

Медведев М. Ю., д.т.н., доцент,
ЮФУ (г. Ростов-на-Дону)

Несмиянов И. А., д.т.н., доцент,
ВолГАУ (г. Волгоград)

Пановко Г. Я., д.т.н., проф.
ИМАШ им. А. А. Благонравова
РАН (г. Москва)

Ронжин А. Л., д.т.н., проф. РАН,
СПИИРАН (г. Санкт-Петербург)

Фоменков С. А., д.т.н., проф.

Чернышев В. В., д.т.н., проф.

Шаронов Н. Г., к.т.н., доцент

Ющенко А. С., д.т.н., проф.,
МГТУ им. Н. Э. Баумана (г. Москва)

Яцун С.Ф., д.т.н., проф.,
ЮЗГУ (г. Курск)

Ответственный секретарь
Вершинина И. П.

Тел.: 8 (8442) 24-81-13

Международный индекс журнала
ISSN 1990-5297

Журнал распространяется
по подписке.

Индекс журнала
по объединенному каталогу
«Пресса России» – 80811
[https://www.pressa-
rf.ru/cat/1/edition/y_e80811/](https://www.pressa-rf.ru/cat/1/edition/y_e80811/)

Тел. Издательства ВолГТУ:

8 (8442) 24-84-05

8 (8442) 24-84-08

zavrio@vstu.ru

Научный журнал
Издается с января 2004 г.
Выходит двенадцать раз в год

№ 4 (275)

Апрель 2023

УЧРЕДИТЕЛЬ:

ФГБОУ высшего образования
«Волгоградский государственный технический университет»

Адрес редакции:

Волгоград, пр. В. И. Ленина, 28.
Телефон: гл. редактор – (88442) 24-80-00

E-mail: president@vstu.ru

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77–61113 от 19 марта 2015 г.

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Волгоградского государственного технического университета

*Авторское право на журнал в целом принадлежит Учредителю,
на отдельные статьи – сохраняется за автором*

*Перепечатка из журнала «Известия Волгоградского государственного технического
университета» категорически запрещена без оформления договора
в соответствии с действующим законодательством РФ*

*При перепечатке материалов ссылка на журнал «Известия Волгоградского
государственного технического университета» обязательна*

© Волгоградский государственный технический университет,

«Известия Волгоградского государственного технического университета», 2023

Head Editor of the scientific journal “Izvestiya VSTU”:

Novakov I. A. – Academician of RAS, Prof., Doctor of Chemistry, President of VSTU

Editorial board:

Baiburin V. B., D. Sc. (Physical and Mathematical Sciences), Prof., Academician of RAS, Honored Scientist of the Russian Federation, State Technical University of Saratov (Saratov, Russia)

Bezyazychny V. F., D. Sc. (Engineering), Prof., Rybinsk State Aviation Technical University named after P.A. Solovyov (Rybinsk, Russia)

Bodrov V. N., D. Sc., Prof., University of Applied Sciences (Berlin, Germany)

Brebels A., PhD, Associate Prof., Faculty of Engineering Science of University of Leuven (Leuven, Belgium)

Burenin A. A., Corresponding Member of RAS, Institute of Machinery and Metallurgy of the FEB RAS (Komsomolsk-on-Amur, Russia)

Golovanchikov A. B., D. Sc. (Engineering), Prof. of VSTU

Grinberg B. A., D. Sc. (Physical and Mathematical Sciences), Institute of Metal Physics, Ural Division of RAS (Ekaterinburg, Russia)

Gurevich L. M., D. Sc. (Engineering), Associate Prof. of VSTU

Dobrushin L. D., D. Sc. (Engineering), E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kiev, Ukraine)

Zlotin S. G., D. Sc. (Chemistry), Prof., N.D. Zelinsky Institute of Organic Chemistry Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia)

Ivanov A. M., D. Sc. (Engineering), Prof., Moscow Automobile and Road Construction University (MADI) (Moscow, Russia)

Ivashchenko N. A., D. Sc. (Engineering), Prof., Honored Scientist of the Russian Federation, Bauman Moscow State Technical University (Moscow, Russia)

Korolev A. V., D. Sc., Prof., State Technical University of Saratov (Saratov, Russia)

Kuzmin S. V., D. Sc. (Engineering), Prof. of VSTU

Kurayev A. A., D. Sc. (Physical and Mathematical Sciences), Prof., Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR) (Minsk, Republic of Belarus)

Lysak V. I., Academician of RAS, Honored Scientist of the Russian Federation, D. Sc. (Engineering), Prof. of VSTU

Markov V. A., D. Sc. (Engineering), Prof., Bauman Moscow State Technical University (Moscow, Russia)

Merten K., D. Sc. (Engineering), Prof., Institute of Chemical Process Engineering (Stuttgart, Germany)

Navrotskiy A. V., D. Sc. (Chemistry), Prof. of VSTU

Nizhegorodtsev R. M., D. Sc. (Economy), Chief research worker, Institute of Control Sciences V. A. Trapeznikov Academy of Sciences (Moscow, Russia)

Pai V. V., D. Sc. (Physical and Mathematical Sciences), Lavrentyev Institute of Hydrodynamics of SB RAS (Novosibirsk, Russia)

Pustovoit V. N., D. Sc. (Engineering), Prof., Honored Scientist of the Russian Federation, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russia)

Rusinov V. L., Corresponding Member of RAS, Institute of Chemical Technology of Ural Federal University (Ekaterinburg, Russia)

Rybin V. V., Corresponding Member of RAS, D. Sc. (Physical and Mathematical Sciences), Prof., St. Petersburg Polytechnic University (St. Petersburg, Russia)

Thai Quang Vinh, D. Sc. (Philosophy), Institute of Information Technology (Hanoi, Vietnam)

Truel J.-L., D. Sc. (Economy), Prof., University Paris Est Créteil, Sorbonne, France, Vice-president of International economists club “Kondratiev Circle”

Fedyanov E. A., D. Sc. (Engineering), Prof. of VSTU

Frolov V. A., D. Sc. (Engineering), Prof., “MATI Russian State Technological University named after K. E. Tsiolkovsky” (Moscow, Russia)

Sharipov V. M., D. Sc. (Engineering), Prof., Moscow State Technical University “MAMI” (Moscow, Russia)

Shakhovskaya L. S., D. Sc. (Economy), Prof. of VSTU

Shcherbakov M. V., D. Sc. (Engineering), Prof. VSTU

SERIES "ROBOTS,
MECHATRONICS
AND ROBOTIC SYSTEMS"

IZVESTIA



VOLGOGRAD STATE TECHNICAL
UNIVERSITY

The Journal is included to the list of peer-reviewed scientific journals and publications of the Higher Attestation Commission (HAC) of the RF for publishing of results of candidates for scientific degrees

Editorial board:

Chairman

Briskin E. S., D. Sc. (Physical and Mathematical), Prof.

Gorobtsov A. S., D. Sc. (Engineering), Prof.

Zhoga V. V., D. Sc. (Physical and Mathematical), Prof.

Zejdís I., PhD, Prof., Ilmenau University (Ilmenau, Germany)

Ermolov I. L., D. Sc. (Engineering), Prof. RAS IPMechRAS (Moscow)

Kalinin Ya. V., Cand. Sc. (Engineering), Assoc. Prof.

Kapustyan S. G., D. Sc. (Engineering), SFEDU (Rostov-on-Don)

Maloletov A. V., D. Sc. (Physical and Mathematical), Innopolis University (Innopolis, Republic of Tatarstan)

Medvedev M. Yu., D. Sc. (Engineering), Assoc. Prof., SFEDU (Rostov-on-Don)

Nesmiyanov I. A., D. Sc. (Engineering), Assoc. Prof., Volgograd SAU (Volgograd)

Panovko G. Ya., D. Sc. (Engineering), Prof., Mechanical Engineering Research Institute of the RAS (Moscow)

Ronzhin A. L., D. Sc. (Engineering), Prof. RAS, SPIIRAS (St. Petersburg)

Fomenkov S. A., D. Sc. (Engineering), Prof.

Chernyshev V. V., D. Sc. (Engineering), Prof.

Sharonov N. G., Cand. Sc. (Engineering), Assoc. Prof.

Yuschenko A. S., D. Sc. (Engineering), Prof., Bauman MSTU (Moscow)

Yatsun S. F., D. Sc. (Engineering), Prof., SWSU (Kursk)

Executive secretary

Vershinina I.P.

Tel.: 8 (8442) 24-81-13

International index of the journal
ISSN 1990-5297

The journal is distributed by subscription.
Index of the magazine according to the united catalog «Press of Russia» – 80811.
https://www.pressa-rf.ru/cat/1/edition/y_e80811/

Tel. Of VSTU editorial office:

8 (8442) 24-84-05

8 (8442) 24-84-08

zavrio@vstu.ru

© Volgograd State Technical University,
"Izvestia VSTU", 2023

Scientific journal

Published since January 2004

12 times a year

№ 4 (275)
April
2023

FOUNDER:

**FSBEI of Higher Education
"Volgograd State Technical University"**

Editorial office address:

Volgograd, Lenin avenue, 28.

Tel.: Head Editor – +7(8442) 24-80-00

E-mail: president@vstu.ru

The journal is registered at the Federal Service on Control in the Sphere of Communication, IT and Mass Communications (Roscomnadzor)
Registration certificate ПИ № ФС77–61113 of March 19, 2015

Is printed according to the decision of editorial-review board of Volgograd State Technical University

The copyright for the journal in general belongs to the Founder, for separate articles – to authors.

*Reprint from the journal "Izvestia VSTU" is strongly forbidden without conclusion of an agreement in accordance with the legislation of the RF
When reprinting the materials, the citation to the journal "Izvestia VSTU" is obligatory*

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Артемяев К. С. 6
Безусов С. О. 12
Бельченко Ф. М. 18
Бордюгов Д. В. 23
Брискин Е. С. 12, 23, 89
Быков А. С. 29, 51
Вершинина И. П. 71
Ветлицын М. Ю. 57
Воробьева Н. С. 77
Даминдаров Р. Р. 34
Дяшкин А. В. 77
Дяшкин-Титов В. В. 77
Ермолов И. Л. 18, 40
Жога В. В. 71
Зеляковский Д. В. 82
Караваев Ю. Л. 45
Князьков М. М. 40
Кошман А. М. 29, 51
Леонард А. В. 29, 51
Макарова Е. А. 57
Малолетов А. В. 34
Марчук Е. А. 64
Мелихова Е. В. 82
Нелюбова А. В. 71
Несмиянов И. А. 77
Остриков П. П. 18
Рогачев А. Ф. 82
Семенов Е. А. 40
Смирная Л. Д. 6
Суханов А. Н. 40
Хачатрян А. А. 89
Шаронов Н. Г. 23, 57
Шурыгин В. А. 51

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Артёмьев К. С., Смирная Л. Д.</i> Об управлении вертикальными реакциями шагающих движителей и их влиянии на тягово-цепные характеристики мобильного робота.....	6
<i>Безусов С. О., Брискин Е. С.</i> Об учете влияния связей с отклоняющимся аргументом на плоское движение сочлененных роботов.....	12
<i>Бельченко Ф. М., Ермолов И. Л., Остриков П. П.</i> Разработка системы видеонаблюдения с возможностью внесения целевых искажений отображаемого пространства совместно с алгоритмами сегментации.....	18
<i>Бордюгов Д. В., Брискин Е. С., Шаронов Н. Г.</i> Об управлении движением мобильного робота с двигателями, работающими на эффекте периодического заклинивания.....	23
<i>Быков А. С., Кошман А. М., Леонард А. В.</i> Разработка и совместное моделирование алгоритмов обработки данных о среде, полученных 2D-LIDAR.....	29
<i>Даминдаров Р. Р., Малолетов А. В.</i> Принципы управления тросовым роботом с помощью экзоскелета.....	34
<i>Ермолов И. Л., Князьков М. М., Семенов Е. А., Суханов А. Н.</i> Исследования надежности сцепления пневматического робота вертикального перемещения с вакуумными захватными устройствами на корпусе судна.....	40
<i>Караваев Ю. Л.</i> Кинематические схемы и подходы к моделированию движения сферических роботов.....	45
<i>Кошман А. М., Быков А. С., Леонард А. В., Шурыгин В. А.</i> Планирование движения наземного робота с учетом его 2D-пространственной ориентации и обходом одного статичного препятствия.....	51
<i>Макарова Е. А., Ветлицын М. Ю., Шаронов Н. Г.</i> Адаптивные захваты робототехнических систем.....	57
<i>Марчук Е. А.</i> О численном моделировании области рабочего пространства гибридного тросового робота.....	64
<i>Нелюбова А. В., Жога В. В., Вершинина И. П.</i> Расчет кинематических характеристик манипулятора-трипода с дополнительной кинематической связью.....	71
<i>Несмиянов И. А., Воробьева Н. С., Дяшкин А. В., Дяшкин-Титов В. В.</i> Обоснование конструктивного исполнения роботизированного устройства для побелки стволов деревьев.....	77
<i>Рогачев А. Ф., Мелихова Е. В., Зеляковский Д. В.</i> Фитотронный комплекс на основе системы технического зрения для интенсивного выращивания растений.....	82
<i>Хачатрян А. А., Брискин Е. С.</i> О перемещении трехопорного мобильного робота по произвольно ориентированной поверхности.....	89
К сведению авторов.....	96

К. С. Артемьев, Л. Д. Смирная

**ОБ УПРАВЛЕНИИ ВЕРТИКАЛЬНЫМИ РЕАКЦИЯМИ
ШАГАЮЩИХ ДВИЖИТЕЛЕЙ И ИХ ВЛИЯНИИ
НА ТЯГОВО-СЦЕПНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МОБИЛЬНОГО РОБОТА***

Волгоградский государственный технический университет
dtm@vstu.ru

Рассматривается проблема повышения тягово-динамических свойств мобильных роботов с шагающими движителями. Анализируется взаимозависимость тяговых усилий, развиваемых движителями, и сил сопротивления движению роботов, обусловленных их взаимодействием с окружающей средой.

Ключевые слова: мобильный робот, шагающий движитель, сила сопротивления, тяговая сила, тягово-сцепные свойства.

K. S. Artemyev, L. D. Smirnaya

**ON CONTROLLING THE VERTICAL REACTIONS OF THE STEPPER
THRUSTERS AND THEIR INFLUENCE ON THE TRACTION
AND COUPLING CHARACTERISTICS OF A MOBILE ROBOT**

Volgograd State Technical University

The problem of increasing thrust and dynamic properties of mobile robots with walking propulsors is studied. Interdependence of traction forces, developed by thrusters and resistance forces to robots movement, caused by their interaction with the environment, is analyzed.

Keywords: mobile robot, walking propulsor, drag force, tractive force, traction properties.

Введение

Особенностью мобильных роботов с шагающими движителями является наличие статической неопределимости при нахождении нормальных реакций опор, если число ног, взаимодействующих с опорной поверхностью на одном из бортов робота, более двух. Это позволяет ставить задачу об управлении данными реакциями тем или иным способом [1, 2, 3]. Статическая неопределимость обусловлена превышением числа опорных реакций над числом уравнений равновесия. Более того, это превышение может быть различным в разные моменты времени,

что определяется реализуемой походкой [4, 5].

При взаимодействии движителей наземных транспортных средств с опорной поверхностью важными характеристиками являются максимальное тяговое усилие и сила сопротивления движению. В случае с шагающими машинами известно выражение для определения осредненной силы сопротивления движения $Q_{\text{сопр}}$ [6, 7].

Для количественной оценки силы тяги требуется рассматривать стопы, погружающиеся в грунт на величину, пропорциональную максимальной нормальной нагрузке $P_{j \max}$ (рис. 1) [8].

$$Q_{\text{сопр}} = \sum_{j=1}^N \frac{P_{j \max}^2}{2cl},$$

$$Q_{\text{тяги max}} = b[\sigma] \sum_{j=1}^N h_j + f \sum_{j=1}^N P_j = b[\sigma] \sum_{j=1}^N \frac{P_{j \max}}{c} + fG = \alpha \sum_{j=1}^N P_{j \max} + fG,$$

© Артемьев К. С., Смирная Л. Д., 2023.

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-21-00882, <https://rscf.ru/project/22-21-00882/>

где c – нормальная жесткость системы «опорная поверхность – стопа движителя»; l – длина шага робота; α – коэффициент пропорциональности, который зависит от геометрических параметров стопы и физико-механических свойств опорной поверхности; f – коэффициент сцепления; $[\sigma]$ – предел прочности грунта на смятие.

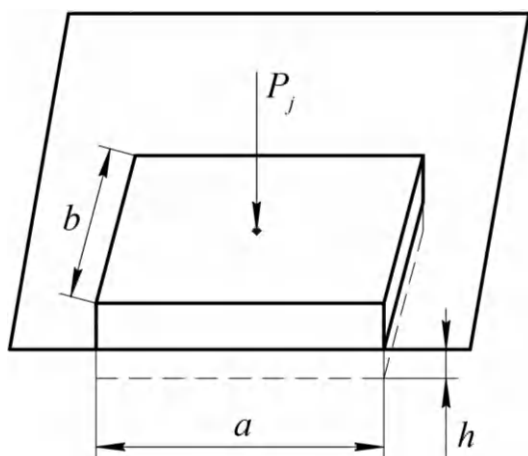


Рис. 1. Силы, действующие на опору механизма шагания со стороны грунта: a, b – размер опоры; h – глубина погружения опоры в грунт; P_j – вертикальная сила, действующая на опору

Таким образом, на силу сопротивления движению и максимальное тяговое усилие влияет распределение нормальных реакций, управление которыми возможно за счет изменения вертикального положения стопы относительно корпуса робота.

Постановка задачи

Расчетная схема шагающей машины предполагает изучение плоского движения корпуса в вертикальной плоскости как твердого тела (рис. 2).

Положение корпуса робота в пространстве описывается координатами его центра масс x_c, y_c и углом тангажа φ . Если перемещение происходит под водой, то вводится выталкивающая сила Φ . При равномерном движении вдоль горизонтальной оси Ox со скоростью V_0 положение стопы j -го движителя относительно центра масс определяется функцией:

$$a_j = a_{j\max} - V_0(t - \tau_{Hj}), \quad (1)$$

где $\tau_{Hj} < t < \tau_{Kj}$; τ_{Hj}, τ_{Kj} – начальный и конечный момент взаимодействия стопы движителя; $a_{j\max}$ – горизонтальное положение стопы движителя в начальный момент взаимодействия с опорной поверхностью.

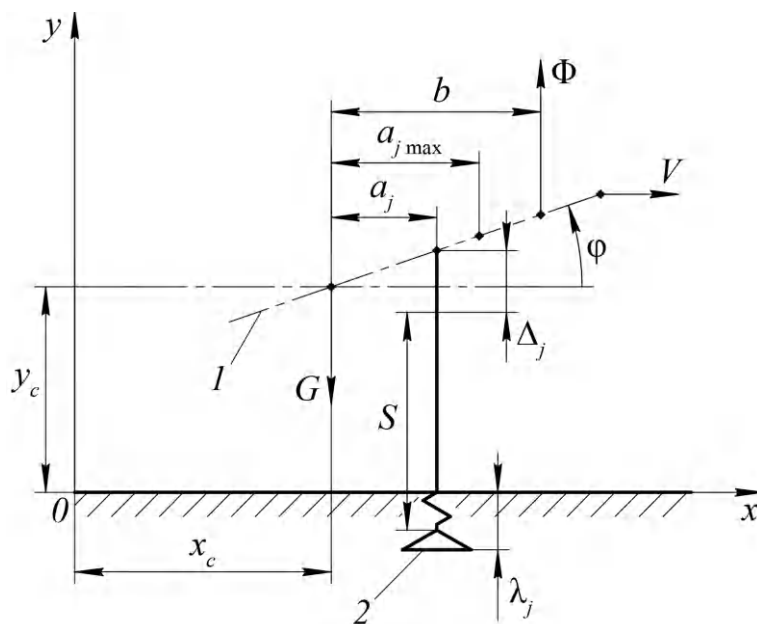


Рис. 2. Расчетная схема шагающей машины: 1 – продольная ось корпуса робота; 2 – опора движителя

Цикл взаимодействия движителя с опорной поверхностью описывается с учетом коэффициента режима γ . Рассматривается только один цикл движения:

$$-\gamma T < \tau_{Hj} < T(1 - \gamma),$$

$$\tau_{Kj} = \tau_{Hj} + \gamma T.$$

При движении мобильного робота могут реа-

лизываться два случая взаимодействия движителя с опорной поверхностью в зависимости

от различных случаев задания расписания движителей (рис. 3, 4):

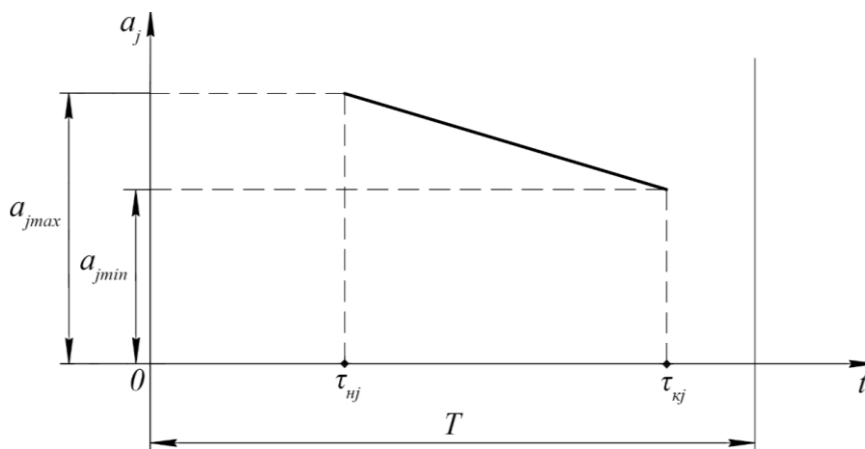


Рис. 3. Зависимость $a_j = a_j(t)$ при $\tau_{Hj} > 0$

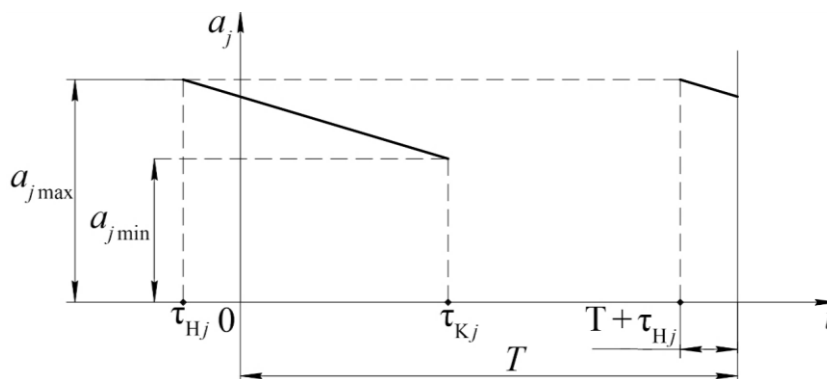


Рис. 4. Зависимость $a_j = a_j(t)$ при $\tau_{Hj} < 0$

В случае $\tau_{Hj} > 0$ движитель находится в контакте с опорной поверхностью в интервале $\tau_{Hj} < t < \tau_{Hj} + \gamma T$, а в промежутке $0 < t < \tau_{Hj}$ и $\tau_{Hj} + \gamma T < t < T$ движитель находится в фазе переноса в новое положение, во время которой условно принимается, что $a_j = 0$.

Если $\tau_{Hj} < 0$, то движитель находится в контакте с опорной поверхностью в интервале $0 < t < \tau_{Hj} + \gamma T$ и $\tau_{Hj} + \gamma T < t < T$, а в промежутке $\tau_{Hj} + \gamma T < t < \tau_{Hj} + T$ движитель находится в фазе переноса в новое положение, во время которой условно принимается, что $a_j = 0$.

Во время взаимодействия j -й стопы движителя с опорной поверхностью ее положение в вертикальном направлении относительно корпуса робота определяется характерными величинами S , Δ , которые показаны на рис. 5 для ортогонального движителя.

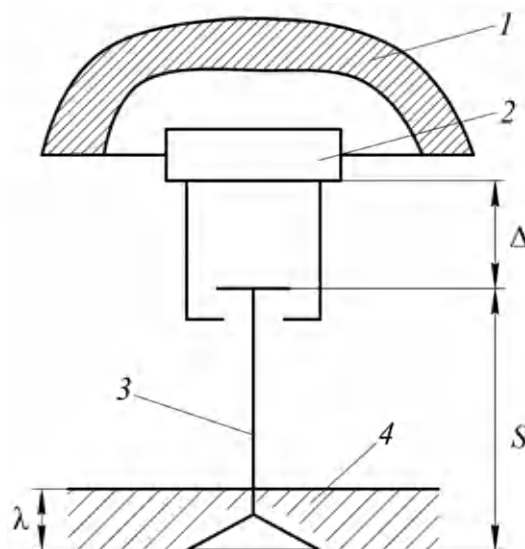


Рис. 5. Ортогональный движитель:
1 — корпус робота; 2 — каретка горизонтального привода;
3 — опорная стойка; 4 — опорная поверхность; λ — деформация грунта под опорой; Δ — величина управляемого выдвижения вертикальной стойки движителя длины S

Таким образом, задавшись начальным продольным положением движителей на корпусе робота $a_{j\max}$, расписанием движения движителей τ_{H_j} , одинаковым коэффициентом режима γ и длиной шага l , весом мобильного робота G , жесткостью замкнутой системы «опорная поверхность – стопа движителя» c , становится возможным определить нормальные реакции P_j как функцию времени $P_j = P_j(t, \Delta_j(t))$ и их максимальные значения.

При этом коэффициент режима γ , длина шага l , скорость робота V и полное время цикла связаны соотношением:

$$\gamma T = \frac{l}{V}.$$

В случае, если необходимо учитывать и сравнивать тяговую характеристику $Q_{\text{тяги max}}$ и силу сопротивления $Q_{\text{сопр}}$ параметра машины, то для оценки влияния расположения движителей на характеристики мобильного робота вводится критерий:

$$I = \frac{Q_{\text{тяги max}}}{Q_{\text{сопр}}}. \quad (2)$$

Ставится задача определения закономерностей вертикальных перемещений Δ_j каждого из движителей в фазе их взаимодействия с опорной поверхностью, обеспечивающих максимум критерия оптимальности (2).

Метод решения

Метод решения поставленной задачи основывается на рассмотрении квазистатического режима движения, поэтому становится возможным составлять уравнения движения робота без учета массово-инерционных характеристик, дополненные уравнениями совместности деформаций, системы «опорная поверхность – стопа движителя» λ_j .

Тогда, усилия взаимодействия P_j :

$$\begin{aligned} P_j &= c\lambda_j, \\ \lambda_j &= -(y_c + \varphi a_j) + (S + \Delta_j). \end{aligned} \quad (3)$$

В течение фазы переноса движителя $\lambda_j = 0$, при этом для движителей, которые должны находиться во взаимодействии с грунтом, но в соответствии с (3) $\lambda_j < 0$ считаются также не взаимодействующими с грунтом, в расчетах принимается $\lambda_j = 0$.

Уравнения квазистатического режима движения шагающего робота имеют вид:

$$\begin{cases} \sum_{j=0}^N P_j = G - \Phi, \\ \sum P_j a_j = -\Phi b. \end{cases} \quad (4)$$

Систему уравнений (4) возможно представить в виде двух линейных алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} y_c^* = y_c - S, \\ -y_c^*(N - k) - \varphi \sum_{j=1}^N a_j = \frac{G - \Phi}{c} - \sum_{j=1}^N \Delta_j, \\ -y_c^* \sum_{j=1}^N a_j - \varphi \sum_{j=1}^N a_j^2 = -\frac{\Phi b}{c} - \sum_{j=1}^N a_j \Delta_j, \end{cases} \quad (5)$$

где k – количество движителей, находящихся в фазе переноса.

При формировании коэффициентов правых частей в уравнениях (5) в различные моменты времени t , a_j определяется в соответствии с (1).

Имитационное моделирование

Задача имитационного моделирования состоит в установлении зависимости критерия (2) при минимизации максимальной реакции со стороны опорной поверхности в каждый момент времени.

При реализации алгоритма управления вертикальным положением движителя Δ_j учитывается, что среднее вертикальное смещение точки подъема движителя к корпусу робота равно нулю:

$$\sum_{j=1}^N \Delta_j = 0.$$

Это условие соответствует требованию постоянного среднего клиренса.

Алгоритм управления состоит из следующих операций:

- 1) определяется движитель, на котором возникает максимальное усилие взаимодействия с опорной поверхностью P_j ;
- 2) уменьшается его вертикальное положение $\Delta_{j\max}$ до того положения, пока реакция взаимодействия данного движителя не станет равной реакции взаимодействия одного из других движителей;
- 3) вертикальные положения Δ_j остальных движителей изменяются в соответствии с зависимостью:

$$\Delta_j = -\frac{\Delta_{j \max}}{N-1}$$

Рассматривается мобильный шагающий робот с четырьмя двигателями $N=4$, установленными на каждом из бортов. Двигатели на бортах установлены симметрично и имеют одинаковое расписание движения.

При моделировании задаются:

1) положение стоп двигателей при максимальном их выдвигении:

$$a_{1 \max} = 3 \text{ м}; a_{2 \max} = 2 \text{ м}; a_{3 \max} = -1 \text{ м}; a_{4 \max} = -2 \text{ м};$$

2) длина шага $l=1$ м;

3) коэффициент режима $\gamma = 0,8$;

4) вес робота $G=10000$ Н;

5) жесткость системы «опора двигателя – опорная поверхность» $c=25000$ Н/м²;

6) время полного цикла движения двигателя $T=16$ с;

7) расписание движения двигателей

$$\tau_{H_1} = 0 \text{ с}; \tau_{H_2} = -4 \text{ с}; \tau_{H_3} = -8 \text{ с}; \tau_{H_4} = 3,2 \text{ с};$$

8) $\alpha = 0,6$.

На рис. 6 представлена диаграмма изменения зависимости $a_j = a_j(t)$ для рассматриваемых четырех двигателей. На этих графиках $a_j = 0$ для моментов времени, когда соответствующий двигатель находится в фазе переноса в новое положение.

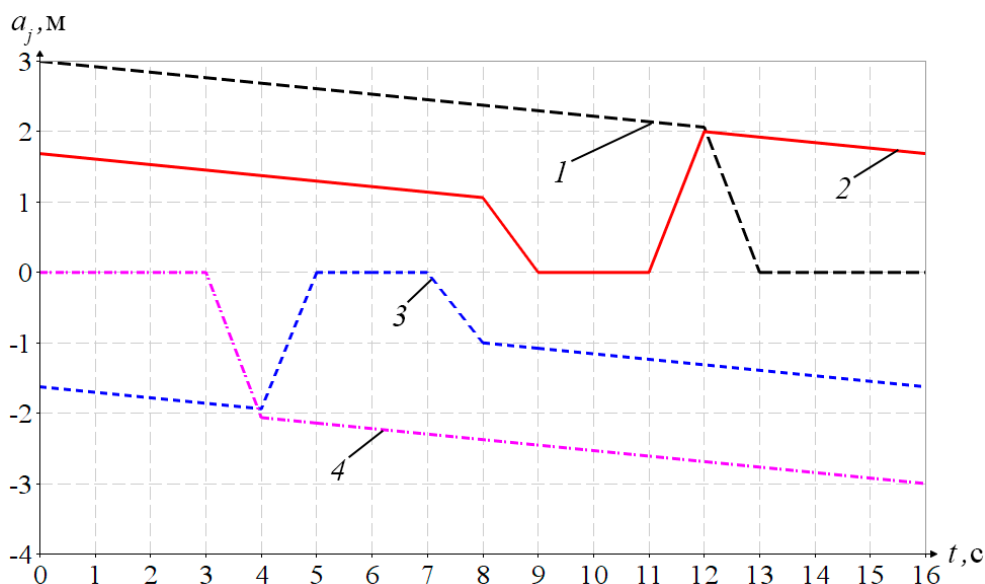


Рис. 6. Расписание движения двигателей:
1, 2, 3, 4 – номер двигателя

Результаты моделирования при управляемом воздействии Δ_j приведены ниже в таблице.

Значения $Q_{\text{сопр}}$ и $Q_{\text{тяги max}}$ без управляющего воздействия
и с управляющим воздействием

Развиваемые усилия	Управляющее воздействие отсутствует	Управляющее воздействие применено
$Q_{\text{сопр}}, \text{ Н}$	2058	1744
$Q_{\text{тяги max}}, \text{ Н}$	12130	11170

Соответственно, критерий оптимальности $I(2)$ равен 5,894 и 6,405.

На рис. 7, 8 показаны возникающие реакции

взаимодействия стопы с опорной поверхностью и управляющее воздействие для каждого из двигателей.

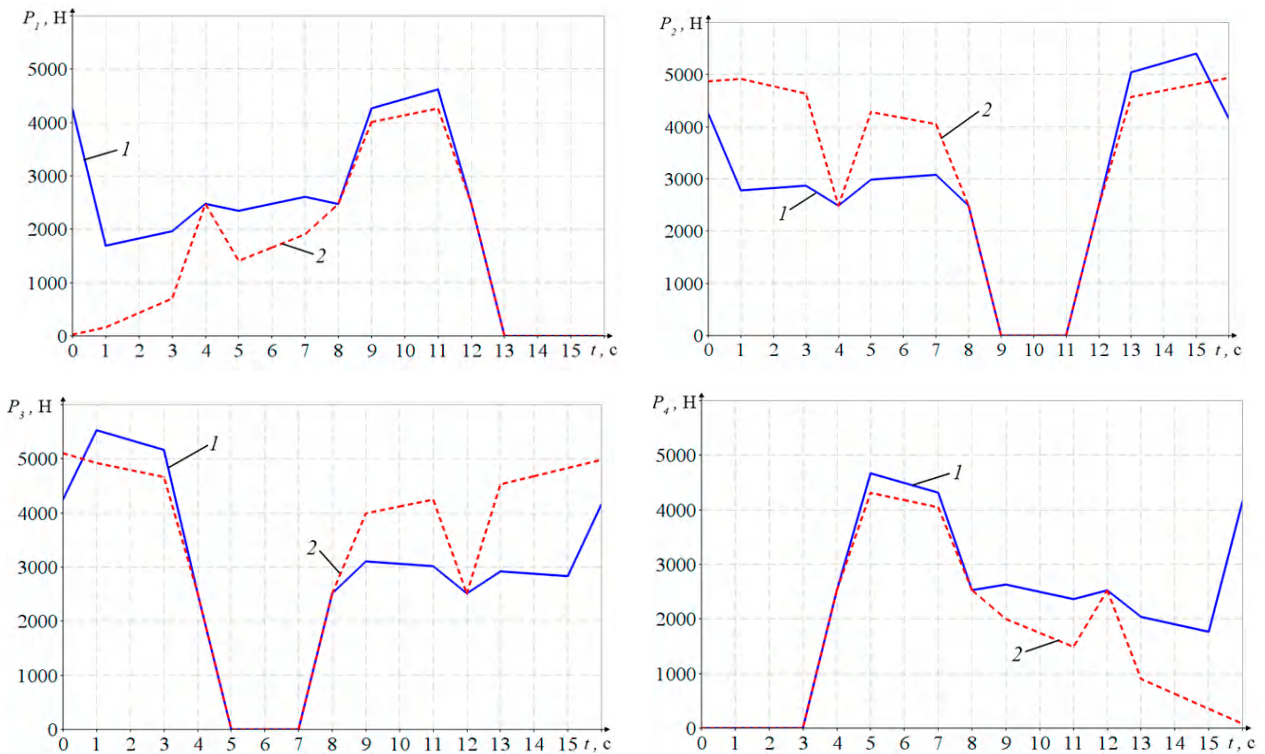


Рис. 7. Усилия взаимодействия стопы с опорной поверхностью:
 1 – без управляющего воздействия; 2 – с управляющим воздействием

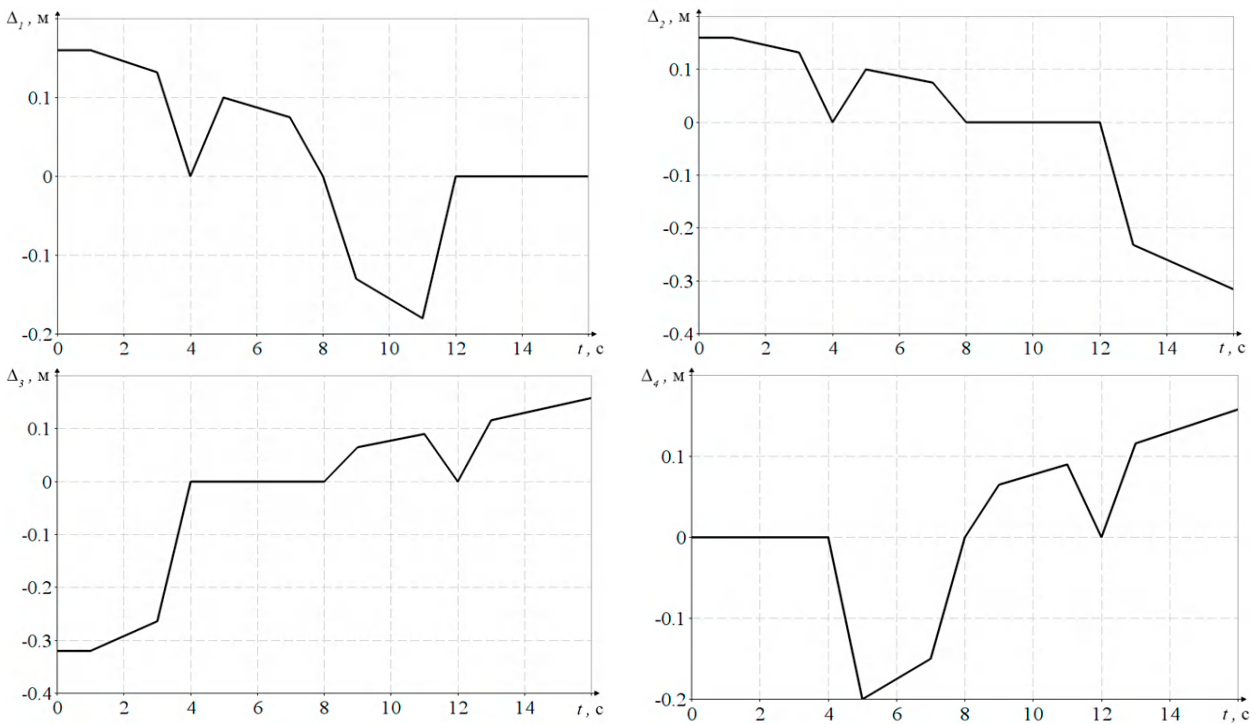


Рис. 8. Изменение вертикального положения движителей

Анализ полученных результатов показывает, что при управлении вертикальным движением движителя в фазе его взаимодействия с грунтом удается уменьшить нормальные реак-

ции воздействия стопы на опорную поверхность и, как следствие, уменьшить силу сопротивления движению.

Выводы

На основании установленных закономерностей вертикальных перемещений Δ_j каждого из движителей в фазе их взаимодействия с опорной поверхностью разработан метод управления вертикальными реакциями. Реализация разработанного алгоритма управления позволяет увеличить величину критерия оптимальности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гориневский, Д. М. О динамике малых движений шагающего аппарата при наличии обратной связи по опорным реакциям / Д. М. Гориневский, А. Ю. Шнейдер // Известия Академии наук СССР. Механика твердого тела. – 1987. – № 6. – С. 39–47.
2. Шнейдер, А. Ю. Управление опорными реакциями шагающего аппарата при движении по грунтам с различными несущими свойствами / А. Ю. Шнейдер, Д. М. Гориневский // Институт проблем передачи информации АН СССР. – Препр. – М.: ИППИ, 1986. – 72 с.

3. Смирная, Л. Д. Об оптимальном распределении нормальных реакций шагающих движителей подводных роботов / Л. Д. Смирная, И. П. Вершинина // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 3(226) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2019. – С. 47–50.

4. Бессонов, А. П. К вопросу о систематике походок шагающих машин / А. П. Бессонов, Н. В. Умнов // Машиноведение. – 1975. – № 6. – С. 23.

5. Охоцимский, Д. Е. Механика и управление движением автоматического шагающего аппарата / Д. Е. Охоцимский, Ю. Ф. Голубев. – М.: Наука. Физматлит, 1984. – 312 с.

6. Игнатъев, М. Б. Алгоритмы управления роботами-манипуляторами / М. Б. Игнатъев, Ф. М. Кулаков, А. М. Покровский. – М.: Машиностроение, Ленинград. отд-ние, 1972. – 248 с.

7. Брискин, Е. С. Об общей динамике и повороте шагающих машин / Е. С. Брискин // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 1997. – № 6. – С. 33–39.

8. Динамика и управление движением шагающих машин с цикловыми движителями / Е. С. Брискин, В. В. Жюга, В. В. Чернышев, А. В. Малолетов. – М.: Машиностроение, 2009. – 191 с.

УДК 681.51

DOI 10.35211/1990-5297-2023-4-275-12-17

С. О. Безусов, Е. С. Брискин

ОБ УЧЕТЕ ВЛИЯНИЯ СВЯЗЕЙ С ОТКЛОНЯЮЩИМСЯ АРГУМЕНТОМ НА ПЛОСКОЕ ДВИЖЕНИЕ СОЧЛЕНЕННЫХ РОБОТОВ*

Волгоградский государственный технический университет

seleron@list.ru

Управление транспортными средствами, законы движения которых одинаковы, но аргументы функций отличаются на постоянное время, является актуальной задачей в современных условиях. Рассматривается метод управления, основанный на уравнениях с отклоняющимися аргументами, и выполнено имитационное моделирование.

Ключевые слова: отклоняющиеся аргументы, движение роботов, конвой.

S. O. Bezusov, E. S. Briskin

ON CONSIDERING THE INFLUENCE OF COUPLINGS WITH A DEVIATING ARGUMENTS ON THE PLANAR MOTION OF ARTICULATED ROBOTS

Volgograd State Technical University

The control of vehicles the motion laws of which are the same, but the function arguments differ by a constant time, is an actual problem in modern contexts. A control method based on equations with deviating arguments is considered and simulation modeling is performed.

Keywords: deviating arguments, robot movement, convoy.

Введение

Известно, что «связями, наложенными на искомое движение данной материальной системы, называются заранее установленные условия, наложенные на изменения геометрических, кинематических и динамических характеристик

системы при ее движении и выражающиеся заданными уравнениями, в частности, и дифференциальными» [1].

Как правило, в механике рассматриваются связи, обусловленные контактным взаимодействием между телами; их разделяют на голоном-

© Безусов С. О., Брискин Е. С., 2023.

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-21-00882, <https://rscf.ru/project/22-21-00882/>

ные и неголономные, удерживающие и не- удерживающие, стационарные и нестационарные [1, 2]. Введение связей позволяет не строить модели физического взаимодействия между телами и тем самым упростить решение задачи исследования динамики движения изучаемой механической системы.

Однако общее определение связей позволяет считать связями и управляющие воздействия на рассматриваемую механическую систему со стороны исполнительных приводов для реализации программного движения на основе данных информационно-измерительной системы. В этом случае связи могут задаваться различным образом [3, 4, 5, 6]. Среди них особое место могут занимать и связи, задаваемые алгебраическими уравнениями с отклоняющимися переменными: запаздывающими или опережающими [7]. Примерами введения таких связей могут быть: движение роботов друг за другом [8, 9] или движение с целью стыковки [10]. В случае запаздывающего аргумента при прямолинейном движении вдоль оси OX уравнение связи может иметь вид

$$x_2(t) = x_1(t - \tau), \quad (1)$$

а в случае опережающего аргумента

$$x_2(t) = x_1(t + \tau).$$

В первом случае второй робот повторяет движение первого с опозданием на время τ , а во

втором, на основе предсказания, второй робот будет иметь координату как у первого через промежуток времени τ .

Постановка задачи

Рассматривается плоское движение двух роботов «Ортоног» (рис. 1), обладающих идеальной или близкой к ней маневренностью [11], т. е. способностью совершать любое наперед заданное плоское движение без проскальзывания движителей по несущей поверхности.



Рис. 1. Робот «Ортоног»

Движение каждого из роботов описывается движением его центра масс и углом поворота строительной оси относительно оси OX (рис. 2).

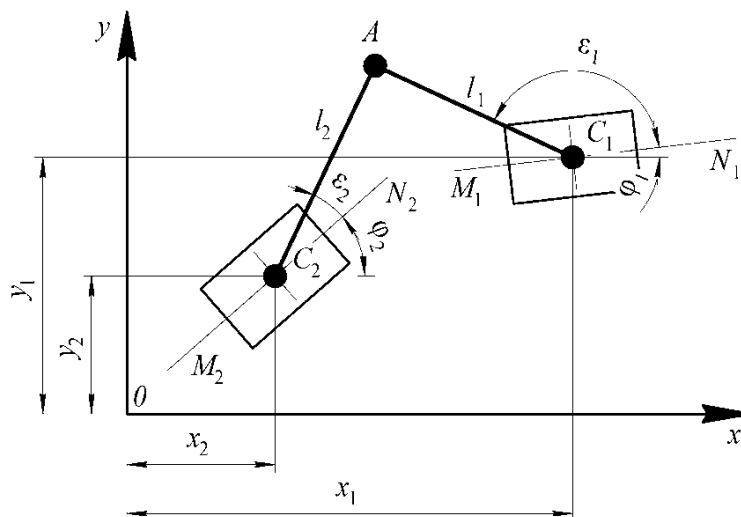


Рис. 2. Схема движения двух роботов:

A – шарнир, соединяющий тяговые рычаги; C_1, C_2 – центры масс роботов 1 и 2; AC_1, AC_2 – тяговые рычаги, обеспечивающие связь между роботами 1 и 2; l_1, l_2 – длины тяговых рычагов; M_1N_1, M_2N_2 – строительные оси роботов 1 и 2; x_1, x_2 – координаты центров масс роботов 1 и 2 по оси OX ; y_1, y_2 – координаты центров масс робота 1 и 2 по оси OY ; φ_1, φ_2 – углы поворота строительных осей роботов 1 и 2 относительно оси OX ; ϵ_1, ϵ_2 – углы поворота тяговых рычагов относительно строительных осей роботов 1 и 2

$$\begin{cases} x_j = x_j(t) \\ y_j = y_j(t) \quad (j=1,2) \\ \varphi_j = \varphi_j(t) \end{cases} \quad (2)$$

Движение роботов осуществляется за счет приводов управления движителями. Движители могут быть шагающими как у робота «Ортоног», колесными, что используются в автопоездах, а перемещаться роботы могут как по организованной поверхности (шоссе, рельсы), так и по неорганизованной (бездорожье). Сочленение роботов может осуществляться различными способами, например, с помощью одного или двух шарниров. Если сочленение роботов осуществляется одним шарниром A , положение которого определяется длиной тяговых рычагов $C_1A=l_1$, $C_2A=l_2$ с управляемой ориентацией, то

$$\begin{aligned} l_1 &= l_1(t), \quad l_2 = l_2(t) \\ \varepsilon_1 &= \varepsilon_1(t), \quad \varepsilon_2 = \varepsilon_2(t) \end{aligned} \quad (3)$$

В общем случае управляемыми параметрами могут быть все четыре введенные характеристики, минимальное их количество равно нулю. Действительно, в отсутствии управляемых тяговых рычагов приводы движителей второго робота должны обеспечить реализацию программы движения

$$\begin{cases} x_2(t) = x_1(t - \tau) \\ y_2(t) = y_1(t - \tau) \\ \varphi_2(t) = \varphi_1(t - \tau) \end{cases} \quad (4)$$

Для этого необходимо иметь, как минимум во втором, ведомом роботе, информационно-измерительную систему, сигналы которой должны поступать на приводы его движителей.

В таблице ниже представлены различные варианты принципиальных систем управления приводами, обеспечивающих изменение параметров (3).

Если количество таких управляемых приводов предусмотрено менее трех, то для обеспечения однозначного движения ведомого робота следует иметь управляемые приводы его движи-

Варианты систем управления приводами

Номер варианта	Параметр			
	l_1	l_2	ε_1	ε_2
1	+	+	+	+
2	+	+	+	-
3	+	+	-	+
4	+	-	+	+
5	-	+	+	+
6	+	+	-	-
7	-	-	+	+
8	-	+	+	-
9	+	-	-	+
10	+	-	+	-
11	-	+	-	+
12	-	-	-	+
13	-	-	+	-
14	-	+	-	-
15	+	-	-	-
16	-	-	-	-

«+» – означает, что имеется управление привода; «-» – управляемый привод отсутствует, параметр свободно изменяется за счет внешних воздействий.

телей. Если управляемых приводов (3) более трех, то для их динамического расчета следует применить методы управления движением механических систем с избыточным числом управляемых воздействий [12, 13].

Ставится одна из возможных задач – формирование законов программного управления длиной тяговых рычагов l_1 и l_2 при известных законах движения первого ведущего робота (2) и задаваемого движения ведомого второго робота (4), повторяющего движения первого с запаздыванием τ при постоянных углах $\varepsilon_1, \varepsilon_2$.

Метод решения

Метод решения основан на разложении в ряд правых частей уравнения (4) по степеням τ

$$\begin{aligned} x_1(t - \tau) &= x_1(t) - \dot{x}_1(t)\tau + \frac{1}{2!}\ddot{x}_1(t)\tau^2 - \frac{1}{3!}\dddot{x}_1(t)\tau^3 + \dots = x_1(t) + B(t; \tau) \\ y_1(t - \tau) &= y_1(t) - \dot{y}_1(t)\tau + \frac{1}{2!}\ddot{y}_1(t)\tau^2 - \frac{1}{3!}\dddot{y}_1(t)\tau^3 + \dots = y_1(t) + C(t; \tau) \\ \varphi_1(t - \tau) &= \varphi_1(t) - \dot{\varphi}_1(t)\tau + \frac{1}{2!}\ddot{\varphi}_1(t)\tau^2 - \frac{1}{3!}\dddot{\varphi}_1(t)\tau^3 + \dots = \varphi_1(t) + A(t; \tau), \end{aligned} \quad (5)$$

где

$$A(t; \tau) = -\dot{\varphi}_1(t)\tau + \frac{1}{2!}\ddot{\varphi}_1(t)\tau^2 - \frac{1}{3!}\dddot{\varphi}_1(t)\tau^3 + \dots$$

$$B(t; \tau) = -\dot{x}_1(t)\tau + \frac{1}{2!}\ddot{x}_1(t)\tau^2 - \frac{1}{3!}\dddot{x}_1(t)\tau^3 + \dots$$

$$C(t; \tau) = -\dot{y}_1(t)\tau + \frac{1}{2!}\ddot{y}_1(t)\tau^2 - \frac{1}{3!}\dddot{y}_1(t)\tau^3 + \dots$$

Тогда сопоставление положения точки A , определяемое местом нахождения первого и второго роботов и геометрическими параметрами тяговых рычагов $l_1, l_2, \varepsilon_1, \varepsilon_2$, приводит к двум уравнениям:

$$\begin{cases} B(t, \tau) = l_1 \cos(\varphi_1 + \varepsilon_1) - l_2 \cos(\varphi_1 + \varepsilon_2) * \\ * \cos A(t; \tau) + l_2 \sin(\varphi_1 + \varepsilon_2) \sin A(t; \tau) \\ C(t, \tau) = l_1 \sin(\varphi_1 + \varepsilon_1) - l_2 \sin(\varphi_1 + \varepsilon_2) * \\ * \cos A(t; \tau) - l_2 \cos(\varphi_1 + \varepsilon_2) \sin A(t; \tau) \end{cases} \quad (6)$$

где

$$\begin{cases} a_{11} = \cos(\varphi_1 + \varepsilon_1); a_{21} = \sin(\varphi_1 + \varepsilon_1) \\ a_{12} = \cos(\varphi_1 + \varepsilon_2) \cos A(t; \tau) - \sin(\varphi_1 + \varepsilon_2) \sin A(t; \tau) \\ a_{22} = \sin(\varphi_1 + \varepsilon_2) \cos A(t; \tau) + \cos(\varphi_1 + \varepsilon_2) \sin A(t; \tau) \\ b_1 = B(t; \tau); b_2 = C(t; \tau) \end{cases} \quad (8)$$

Из систем уравнений (7) определяются искомые величины l_1 и l_2 :

$$l_2 = (a_{11}b_2 - a_{21}b_1) / (a_{12}a_{21} - a_{11}a_{22})$$

$$l_1 = (a_{22}(a_{11}b_2 - a_{21}b_1) + b_2) / a_{21}(a_{12}a_{21} - a_{11}a_{22}) \quad (9)$$

Система уравнений имеет ограниченное количество решений – рычаги должны пересекаться друг с другом, а центры масс роботов не должны совпадать, что обусловлено взаимным положением роботов и углами поворота тяговых рычагов.

В полученных уравнениях, при задаваемом движении первого робота (а в общем случае, любого другого, называемом ведущим) и времени отклонения аргумента τ , функции $A(t; \tau), B(t; \tau), C(t; \tau)$ известны. Тогда уравнения (6) – это условия, накладываемые на управляющие параметры $l_1, l_2, \varepsilon_1, \varepsilon_2$. Систему управления можно строить различными способами, в частности, взяв за основу два независимых параметра из четырех.

Таким образом, если осуществлять управление длинами тяговых рычагов l_1 и l_2 при $\varepsilon_1 = \text{const}, \varepsilon_2 = \text{const}$, то систему уравнений (6) удобно представить в форме:

$$\begin{cases} a_{11}l_1 - a_{12}l_2 = b_1 \\ a_{21}l_1 - a_{22}l_2 = b_2 \end{cases} \quad (7)$$

Имитационное моделирование

Рассмотрим два варианта возможного движения роботов:

- 1) $x_1(t) = t; y_1(t) = \sin(t \cdot \pi / 5); \varphi_1(t) = 0; \tau = 1;$
 $\varepsilon_1 = 2\pi / 3; \varepsilon_2 = 2\pi / 3; \varphi_1(0) = \varphi_2(0) = 0;$
- 2) $x_1(t) = t$ при $t < 6$ и $x_1(t) = 12 - t$ при $t \geq 6;$
 $y_1(t) = 0; \varphi_1(t) = 0; \tau = 6; \varepsilon_1 = 3\pi / 4; \varepsilon_2 = \pi / 4;$
 $\varphi_1(0) = \varphi_2(0) = 0;$

Результаты решения уравнений (8) и (9) для двух рассматриваемых вариантов движения представлены на графиках (рис. 3–6).

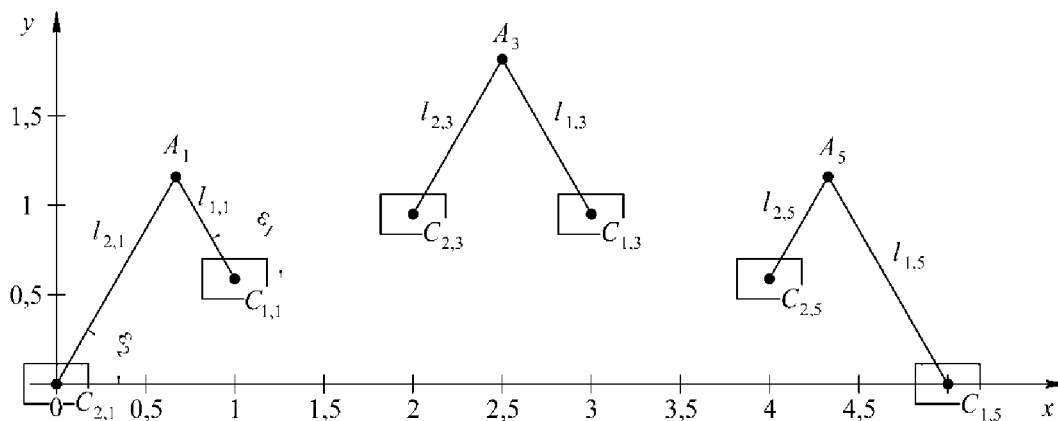


Рис. 3. Положение двух роботов, связанных тяговыми рычагами:

C_{1i}, C_{2i} – центры масс роботов 1 и 2 в момент времени i ; l_{1i}, l_{2i} – длины рычагов в различные моменты времени i

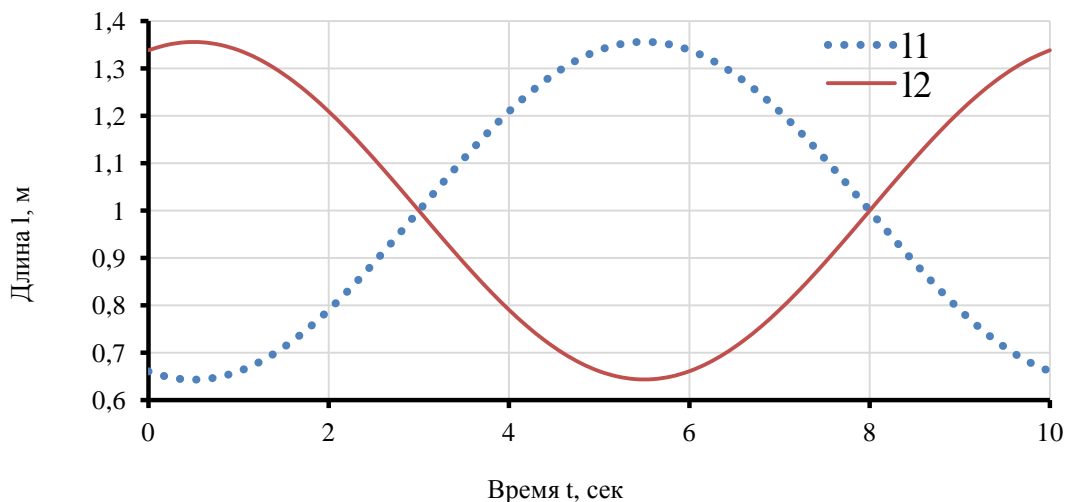


Рис. 4. Зависимость длины тяговых рычагов l_1 и l_2 от времени t

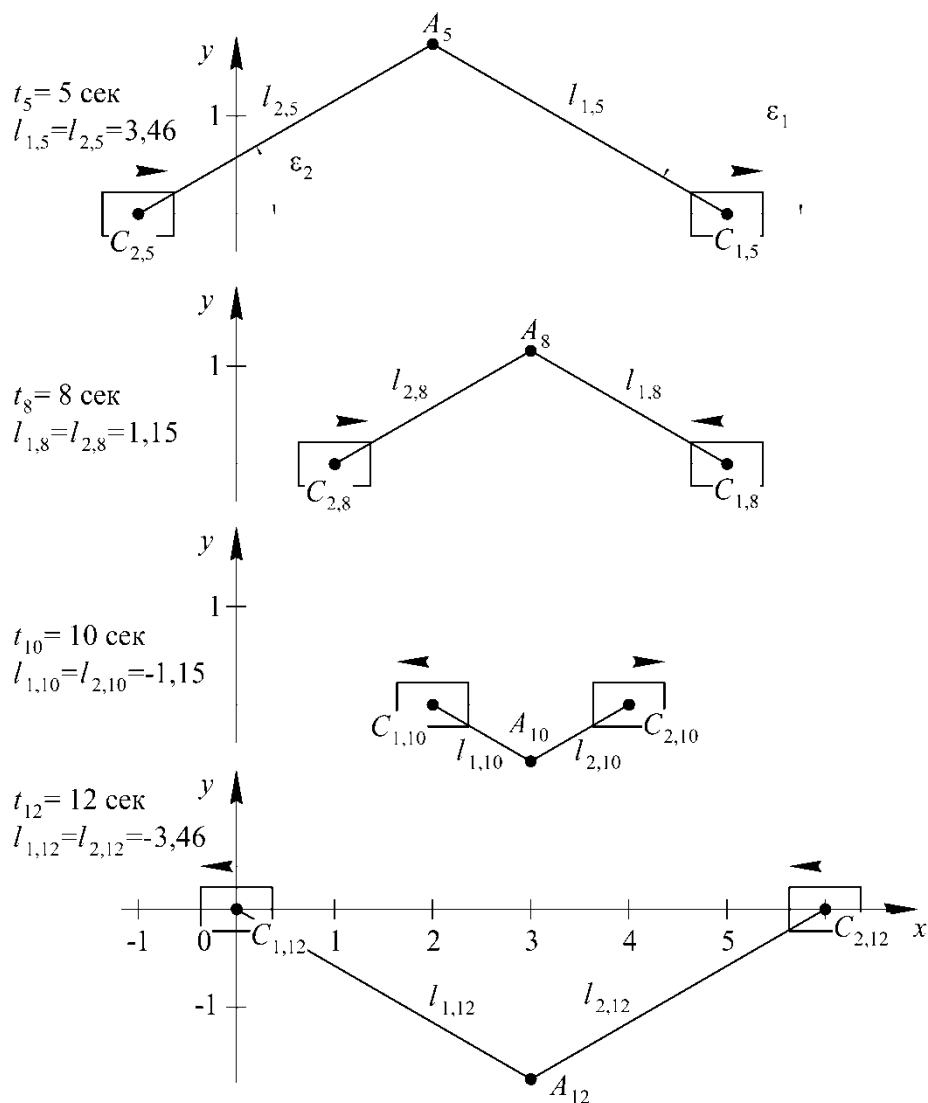
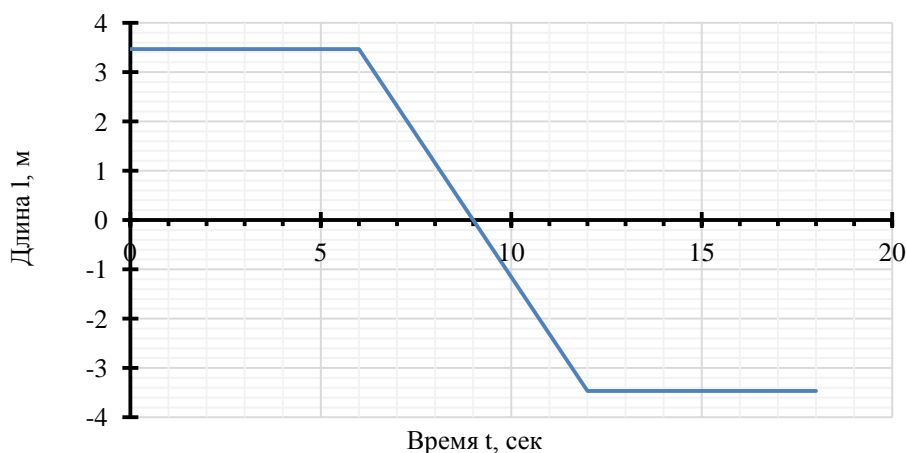


Рис. 5. Изменение направления движения двух роботов, связанных тяговыми рычагами длиной l_1 и l_2 в различные моменты времени t

Рис. 6. Зависимость длины тяговых рычагов l_1 и l_2 от времени t

Заключение

Обосновываются задачи управления механическими системами со связями с отклоняющимся аргументом. Предложен один из методов решения подобных задач. Рассмотрена одна из модельных задач о плоском движении двух твердых тел, связанных стержнями переменной управляемой длины.

Практическая значимость поставленных задач состоит в использовании их результатов при формировании согласованного движения группы роботов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Добронравов, В. В. Основы аналитической механики / В. В. Добронравов. – М.: Высш. школа, 1976. – 263 с.
2. Бутенин, Н. В. Введение в аналитическую механику / Н. В. Бутенин. – М.: Наука, 1971. – 264 с.
3. Голубев, Ю. Ф. Механические системы с сервосвязями / Ю. Ф. Голубев // ПММ. – 2001. – Т. 65. Вып. 2. – С. 211–224.
4. Козлов, В. В. Динамика систем с сервосвязями. I / В. В. Козлов // Нелинейная динамика. – 2015. – Т. 11. – № 2. – С. 353–376.
5. Козлов, В. В. Динамика систем с сервосвязями. II / В. В. Козлов // Нелинейная динамика. – 2015. – Т. 11. – № 3. – С. 579–611.
6. Формирование свойств движения механических систем за счет управления реакциями голономных квазиидеальных связей / Е. С. Брискин, В. В. Павловский, В. Е. Павловский, Л. Д. Смирная // Известия Российской

академии наук. Теория и системы управления. – 2021. – Т. 6. – № 6. – С. 13–23.

7. Смирная, Л. Д. Групповое движение роботов при учете влияния связей с отклоняющимся аргументом / Е. С. Брискин, Л. Д. Смирная // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 4 (263) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2022. – С. 53–57.

8. Зенкевич, С. Л. Управление движением группы роботов в строю типа «конвой» / С. Л. Зенкевич, Х. Чжу // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2017. – Т. 18, № 1. – С. 30–34.

9. Зенкевич, С. Л. Экспериментальное исследование движения группы мобильных роботов в строю типа «конвой» / С. Л. Зенкевич, Ч. Хуа, Х. Цзяньвень // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2018. – Т. 19, № 5. – С. 331–335.

10. Яскевич, А. В. Контактные силы в уравнениях движения космических аппаратов при стыковке и причаливании / А. В. Яскевич // Космическая техника и технологии. – 2018. – № 2(21). – С. 80–92.

11. Об управлении движением шагающей машины со сдвоенными ортогонально-поворотными движителями / Е. С. Брискин, И. П. Вершинина, А. В. Малолетов, Н. Г. Шаронов // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2014. – № 3. – С. 168.

12. Брискин, Е. С. Об управлении движением механических систем с избыточным числом управляющих воздействий / Е. С. Брискин, Н. Г. Шаронов // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2019. – № 3. – С. 48–54.

13. Брискин, Е. С. О математическом моделировании управления движением твердого тела с избыточным числом тросовых движителей / Е. С. Брискин, В. Н. Платонов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2019. – Т. 20, № 7. – С. 422–427.

УДК 621.865.8-182.3: 623

DOI 10.35211/1990-5297-2023-4-275-18-22

*Ф. М. Бельченко, И. Л. Ермолов, П. П. Остриков***РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ВИДЕОНАБЛЮДЕНИЯ С ВОЗМОЖНОСТЬЮ
ВНЕСЕНИЯ ЦЕЛЕВЫХ ИСКАЖЕНИЙ ОТОБРАЖАЕМОГО ПРОСТРАНСТВА
СОВМЕСТНО С АЛГОРИТМАМИ СЕГМЕНТАЦИИ*****Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского
Российской академии наук**

philepp@mail.ru, ermolov@ipmnet.ru, ostricov93@yandex.ru

В работе исследуются пути повышения эффективности современных систем видеонаблюдения и телеметрии в робототехнике. Предложено внедрение наработок из теории представления перцептивного пространства в средствах видеонаблюдения на ответственных объектах. Описаны проводимые в настоящее время разработки. Целью работы является повышение эффективности работы операторов робототехнических систем видеоконтроля и диагностики при выявлении различных нестандартных ситуаций. В качестве основного метода предлагается внесение целевых искажений в видеоизображения, получаемые от средств видеонаблюдения. Дополнительно предлагается использование алгоритмов сегментации для особых случаев. Проведено совместное испытание сегментирования с помощью метода сдвига среднего на изображении после преобразования перспективы.

Ключевые слова: видеонаблюдение, слежение, перспективные преобразования, системы технического зрения.

*Ph. M. Belchenko, I. L. Ermolov, P. P. Ostrikov***VISUAL SURVEILLANCE SYSTEM WITH TARGET-ORIENTED
DISTORSIONS AND SEGMENTATION ALGORITHMS****Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics
of the Russian Academy of Sciences**

This paper studies a new approach to improve efficiency of modern surveillance and telemetry systems in robotics. It is based on theory of perceptive space applied to visual surveying of critical objects. A main goal of the study is to improve efficiency of human operator while inspecting or diagnosing various emerging situations. As a key solution we propose to introduce target distortions into images received from surveillance cameras. Additionally segmentation algorithms for peculiar situations also are presented. Results of final of a robot testing of joint performance of segmentation combined with mean shift after perception transformation are discussed.

Keywords: video surveillance, tracking, perception transformation, machine vision.

Человек в цепи управления системой через видеонаблюдение является ключевым звеном. При этом он сильно ограничен техническими возможностями информационных средств [6], ему свойственно допускать ошибки принятия решений, он подвержен стрессу, усталости. Следовательно, необходимо проводить разработки, облегчающие и повышающие эффективность работы оператора.

На человека-оператора работа возложена, как правило, разнообразные задачи принятия решений и управления высокого уровня, а на машинную часть – исполнение заданий и задачи управления низших уровней. В связи с этим происходит постоянный информационный обмен между роботом и человеком, в том числе

через передачу информации визуальными средствами отображения. Соответственно качество восприятия информации человеком-оператором от видеопульта будет определять, в значительной мере, и эффективность управления, а значит, и эффективность применения всей системы (робота, космического корабля, пилотируемого летательного аппарата, системы видеонаблюдения и пр.).

Даже для подготовленных специалистов задача удаленного управления и контроля с использованием видеоинформации является сложной задачей. И необходимы различные вспомогательные алгоритмы и устройства для предоставления достоверной информации на монитор пульта управления. Под достовернос-

© Бельченко Ф. М., Ермолов И. Л., Остриков П. П., 2023.

* Часть работы над данным материалом выполнена по теме государственного задания (№ государственной регистрации FFGN-2023-0002).

тью здесь можно понимать получение оператором информации без искажений и временных задержек [1].

Большинство искажений возникают при воспроизведении трехмерной информации на плоские (двумерные) устройства (всевозможные дисплеи и мониторы). При этом доминирование тех или иных искажений оказывает влияние на эффективность восприятия информации оператором. Данную проблему можно пробовать решать с помощью технологии виртуальной реальности (VR), но эти технологии пока не являются совершенными. При длительном использовании (около часа) у оператора возникают ощущения тошноты и головокружения при частоте обновления изображения ниже 60 Гц [2]. Для снижения этого эффекта необходима более высокая смена частоты кадров, но для этого требуются серьезные вычислительные ресурсы, которые далеко не всегда можно реализовать в компактном и дешевом исполнении. Для этого должна осуществляться передача по каналу связи более качественных изображений высокой плотностью видеопотока, что далеко не всегда реализуемо на портативных устройствах в реальном времени.

Второй существенной проблемой при реализации управления и контроля оператором при помощи видеопотока являются временные задержки вывода информации на экран. Величина задержек зависит как от качества и размера самого видео, так и от выбранных алгоритмов сжатия видеоданных, параметров и способа передачи информации и наличия помех в канале связи.

При выполнении некоторых задач оператору необходимо длительное время концентрироваться на мониторе. Задержка видеoinформации на экране может вызвать у оператора головокружение, тошноту и другие симптомы.

Еще одной проблемой можно назвать эргономику отображаемой информации на мониторе. При разработке графических интерфейсов необходимо учитывать, что они всегда ограничивают восприятие оператора, и необходимо предусмотреть алгоритмы, которые будут выводить дополнительную информацию лишь при необходимости.

В настоящей работе предложен ряд реше-

ний по совершенствованию систем видеонаблюдения [3]. В качестве основного решения предлагается применить наработки в области теории отображения перцептивного пространства, ранее успешно использовавшиеся в космической отрасли [7, 8]. Благодаря стремительному развитию и удешевлению систем технического зрения и видеонаблюдения данные разработки стало возможно внедрять в робототехнике [10], системах видеоконтроля и диагностики.

На базе лаборатории робототехники и мехатроники Института проблем механики им. А. Ю. Ишлинского в настоящее время начата разработка тестового варианта программного обеспечения, вносящего целевые искажения для систем видеонаблюдения и телеметрии. За основу для разработок взята библиотека OpenCV [4] для работы с системами технического зрения. Внедрение данной библиотеки позволяет упростить написание некоторых сложных функций для программного обеспечения.

В настоящее время уже разработана статическая модель программного обеспечения для систем телеметрии (рис. 1). Основу данной программы составляют три модуля:

1. Интерфейс управления, отвечающий за связь аппаратной части системы телеметрии с программным обеспечением.

2. Обработчик, осуществляющий получение информации с видеокамеры и проводящий первичную обработку видеоизображения.

3. Модуль алгоритмов внесения искажений, вносящий целевые искажения для получения видеоизображения с заданными характеристиками.

Основные алгоритмы для внесения целевых искажений будут работать с преобразованиями перспективы. Для самого преобразования перспективы необходима матрица 3 на 3. Прямые линии после преобразования остаются прямыми, но их пропорции изменяются. Матрица определяется координатами четырех точек входного изображения и соответствующих им точек выходного изображения [4].

Для возможности выделения областей на изображении реализуем набор специальных функций (рис 2).

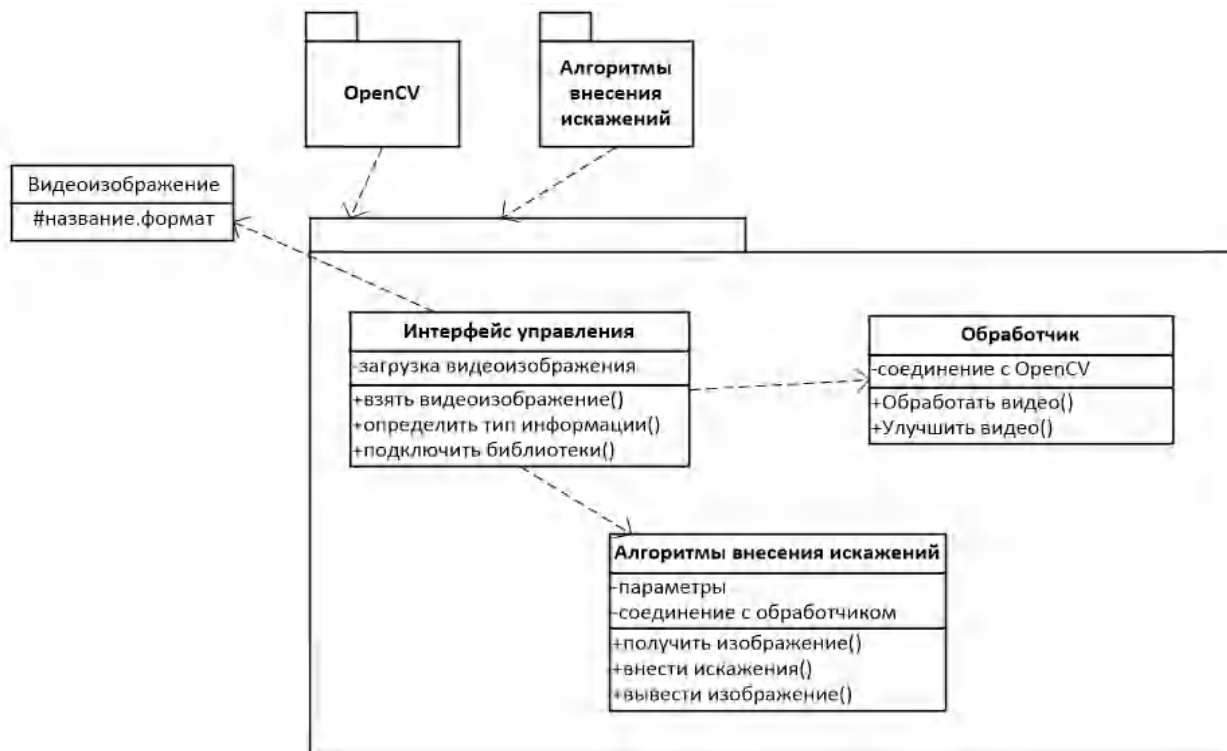


Рис. 1. Статическая модель разрабатываемого программного обеспечения системы телеметрии

```

imshow(windowTitle, image);
midpoints[0] = (roi_corners[0] + roi_corners[1]) / 2;
midpoints[1] = (roi_corners[1] + roi_corners[2]) / 2;
midpoints[2] = (roi_corners[2] + roi_corners[3]) / 2;
midpoints[3] = (roi_corners[3] + roi_corners[0]) / 2;
dst_corners[0].x = 0;
dst_corners[0].y = 0;
dst_corners[1].x = (float)norm(midpoints[1] - midpoints[3]);
dst_corners[1].y = 0;
dst_corners[2].x = dst_corners[1].x;
dst_corners[2].y = (float)norm(midpoints[0] - midpoints[2]);
dst_corners[3].x = 0;
dst_corners[3].y = dst_corners[2].y;
Size warped_image_size = Size(cvRound(dst_corners[2].x), cvRound(dst_corners[2].y));
  
```

Рис. 2. Фрагмент кода с выделением углов на изображении

На рис. 3 приведен пример, в котором выделяется область для преобразования изображения. В обоих случаях создаются по четыре объекта класса точка. Точки выбираются оператором системы видеонаблюдения для целевой области. Для разных задач эти точки необходимо подбирать индивидуально.

Далее системе необходимо из выделенных точек получить матрицу перспективного преобразования и применить ее. Для этого бы-

ли использованы функции `getPerspectiveTransform` и `warpPerspective` (рис. 4), принимающие в качестве аргументов изображения и массив точек для преобразования.

Функция `getPerspectiveTransform` в данном случае возвращает матрицу перспективного преобразования, вычисленную по массивам `src` и `dst`. Далее `warpPerspective` применяет перспективное преобразование к изображению `src` и получает новое изображение `dst`.

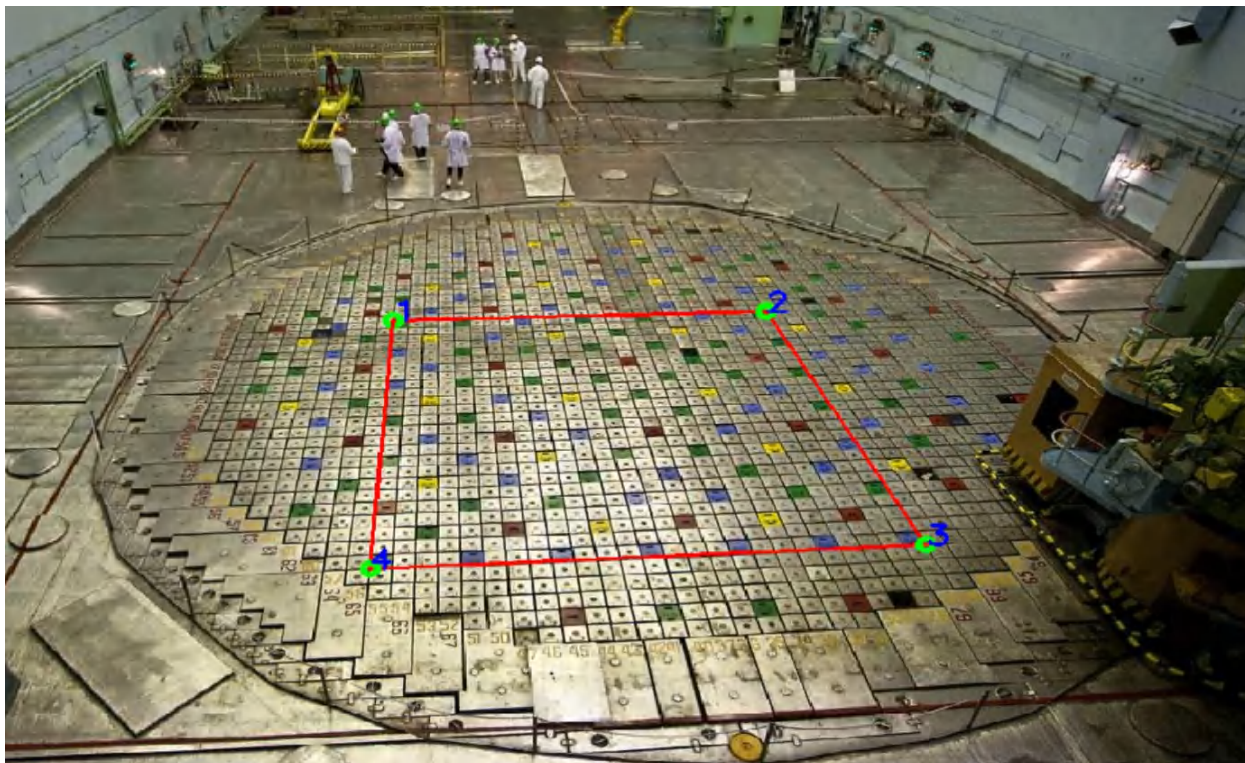


Рис. 3. Выбор точек, определяющих границы перспективной трансформации [9]

```
Mat M = getPerspectiveTransform(roi_corners, dst_corners);
Mat warped_image;
warpPerspective(original_image, warped_image, M, warped_image_size);
imshow("Warped Image", warped_image);
```

Рис. 4. Создание матрицы перспективного преобразования

Проведя преобразование перспективы, возможно реализовать один из алгоритмов сегментации для создания карты цветных элементов на изображении. Для эксперимента будем использовать сегментацию по методу сдвига сред-

него [4]. Для реализации сегментации зададим радиусы для пространственных переменных (spatialRadius) и цветовых переменных (colorRadius) (рис. 5).

```
cv::Mat imageSegment2;
int spatialRadius = 30;
int colorRadius = 35;
int pyramidLevels = 2;
cv::pyrMeanShiftFiltering(warped_image, imageSegment2, spatialRadius, colorRadius, pyramidLevels);
cv::imshow("MeanShiftPerspective", imageSegment2);
```

Рис. 5. Настройка алгоритма сегментации методом сдвига среднего

Получив преобразованное изображение и реализовав алгоритм сегментации, получим два изображения (рис. 6).

На рис. 6, а приведено изображение после перспективного преобразования, представляющее повернутое изображение поверхности реакторного зала (или любых других плоских по-

верхностей). Таким образом, мы можем рассмотреть элементы на поверхности земли, как на карте или «Виде сверху». Данный вид преобразований способен эффективно работать с видеоизображениями в реальном времени, что также применимо в системах телеметрии и картографирования [5].



Рис. 6. Реализация алгоритма перспективного преобразования (а) и сегментации (б)

На рис. 6, б представлен результат сегментации, где были затерты элементы, близкие по цвету. В результате нами была получена карта ярких элементов на поверхности. Подобные алгоритмы можно использовать совместно с преобразованиями перспективы для выявления нестандартных ситуаций и отслеживания инородных объектов (совместно с методами классификации).

В настоящее время в лаборатории робототехники и мехатроники Института проблем механики им. А. Ю. Ишлинского проводятся математические исследования для совершенствования данной системы, которые необходимы для улучшения точности получаемого изображения на различных планах и правильного выделения областей в различных ситуациях [3].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. От ROS к единству: использование промежуточного программного обеспечения роботов и виртуальной среды для иммерсивных телеопераций / Кодд-Дауни, П. М. Форушани, А. Спирс, Х. Ван, М. Дженкин // Международная конференция IEEE по информации и автоматизации (ICIA), 2014. – С. 932–936.
2. Ван, Юй. Система управления мобильным роботом с технологией виртуальной реальности / Юй Ван // Научно-образовательный журнал для студентов и преподавателей «StudNet». – 2022. – № 4. – С. 1938–1957.
3. Belchenko, F. M. Concept development of telemetry system for robotic systems with the ability to introduce targeted distortions of displayed space / F. M. Belchenko, I. L. Ermolov // Robotics and Technical Cybernetics. – 2021. – Vol. 9. – № 1. – Pp. 26–31.
4. Learning Image Processing with OpenCV / G. Garsia, O. Soares, G. Aranda, S. Tersero, O. Graso, N. Enano // Publisher Packt: USA, 2015, ISBN: 9781783287659. – 232 p.
5. Belchenko, F. M. A New Approach to Images' Perspective Transformation in Robotics Telemetry / F. M. Belchenko, I. L. Ermolov // Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie. – 2021. – № 22(12). – Pp. 644–649 (in Russian).
6. Ermolov, I. Hierarchical data fusion architecture for autonomous systems / I. Ermolov // ACTA IMEKO. – 2019. – Vol. 8. – No. 4. – Pp. 28–32.
7. Kovalev, A. M. O vizual'no vosprinimaemom prostanstve predmetov [On the visually perceived space of objects] // Avtometriya. – 2003. – 39 (6). – Pp. 3–12 (in Russian).
8. Raushenbakh, B. V. Geometriya Kartiny i Zritel'noe Vospriyatie [Image Geometry and Visual Perception] / B. V. Raushenbakh. – Saint Petersburg : Azbuka-klassika Publ., 2002. – 320 p. (in Russian).
9. Belchenko, F. M., Fedorets, O. N., Silin, S. I. and Leonov, A. I. Identifikatsiya predmetov po raspolzheniyu uglov dlya realizatsii tekhnicheskogo zreniya robototekhnicheskogo kompleksa [Identification of objects by the location of the corners for the implementation of technical vision of the robotic complex]. No.2016663608, Russian Federation, 2017 (in Russian).
10. Бельченко, Ф. М. Новый подход к преобразованию перспективы изображений в системах телеметрии роботов / Ф. М. Бельченко, И. Л. Ермолов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2021. – Т. 22. – № 12. – С. 644–649.

УДК 629.1.02

DOI 10.35211/1990-5297-2023-4-275-23-28

*Д. В. Бордюгов, Е. С. Брискин, Н. Г. Шаронов***ОБ УПРАВЛЕНИИ ДВИЖЕНИЕМ МОБИЛЬНОГО РОБОТА С ДВИЖИТЕЛЯМИ, РАБОТАЮЩИМИ НА ЭФФЕКТЕ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ЗАКЛИНИВАНИЯ****Волгоградский государственный технический университет**

denklopuk@gmail.com

Рассматривается робот, перемещающийся по горизонтально расположенному стержню. Конструкция включает в себя две втулки, одна из которых за счет сил трения в результате заклинивания обхватывает стержень и удерживается на нем, в то время как другая – свободно перемещается. Принцип работы движителя основывается на эффекте периодического заклинивания.

Ключевые слова: робот, заклинивание, управление движением, математическая модель.

*D. V. Boryugov, E. S. Briskin, N. G. Sharonov***MOTION CONTROL OF THE MOBILE ROBOT WITH MOTORS WORKING ON THE PERIODIC JAMMING EFFECT****Volgograd State Technical University**

We consider a robot moving along a horizontally located rod. The design includes two bushings, one of which, due to frictional forces as a result of jamming, wraps around the rod and is held on it, while the other one moves freely. The principle of operation of the propeller is based on the effect of periodic jamming.

Keywords: robot, jamming, motion control, mathematical model.

Введение

В условиях неорганизованной среды роботы дискретно взаимодействующие с опорной поверхностью, имеют существенные преимущества по сравнению с машинами, использующими традиционные типы приводов [1, 2, 3]. Лазающие роботы, предназначенные для перемещения по вертикальным поверхностям стен, столбам, балкам и так далее, занимают особое место среди них. В их конструкции используются различные типы движителей. За счет механических захватов [4], сил трения [5, 6], магнитов [7], вакуумных присосок [8, 9] обеспечивается постоянное взаимодействие мобильного робота с опорной поверхностью. Поэтому исследование управления движением роботов, движущихся по цилиндрическим поверхностям на основе рассматриваемого метода, является важной и актуальной задачей.

Постановка задачи

Рассматривается мобильный робот, перемещающийся по горизонтально расположенной цилиндрической направляющей и состоящий из двух втулок, связанных между собой линейным электроприводом.

Движение робота осуществляется за счет воздействия линейного привода 2 на втулки 1. Привод закреплен на шарнирах, что позволяет

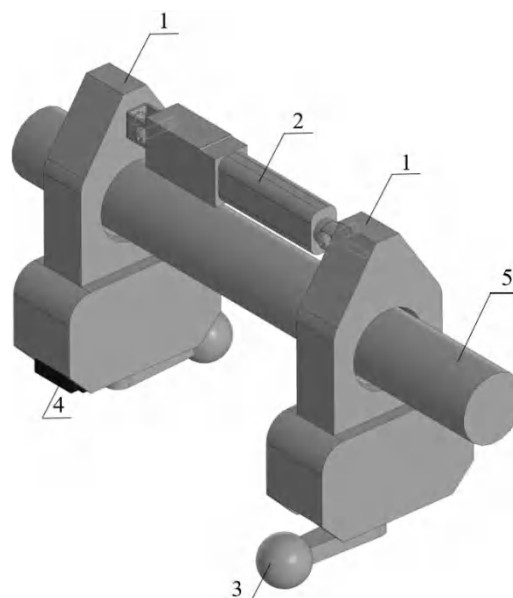


Рис. 1. Модель проектируемого робота:

1 – втулка; 2 – линейный привод; 3 – дополнительный груз;
4 – сервопривод; 5 – стержень

втулкам менять угол наклона. Заклинивание одной из втулок зависит от направления движения робота и происходит следующим образом: сервопривод 4 поворачивает стержень с закрепленным дополнительным грузом 3; под действием массы груза и силы трения происходит заклинивание втулки со стержнем 5, в то время как другая – свободно перемещается по нему.

Одна из втулок мобильного робота находится в постоянном зацеплении с поверхностью (втулка 1), в то время как другая – свободно перемещается по стержню (втулка 2). Математи-

ческая модель мобильного робота представлена на рис. 2. Допускается свободное скольжение незакрепленной втулки.

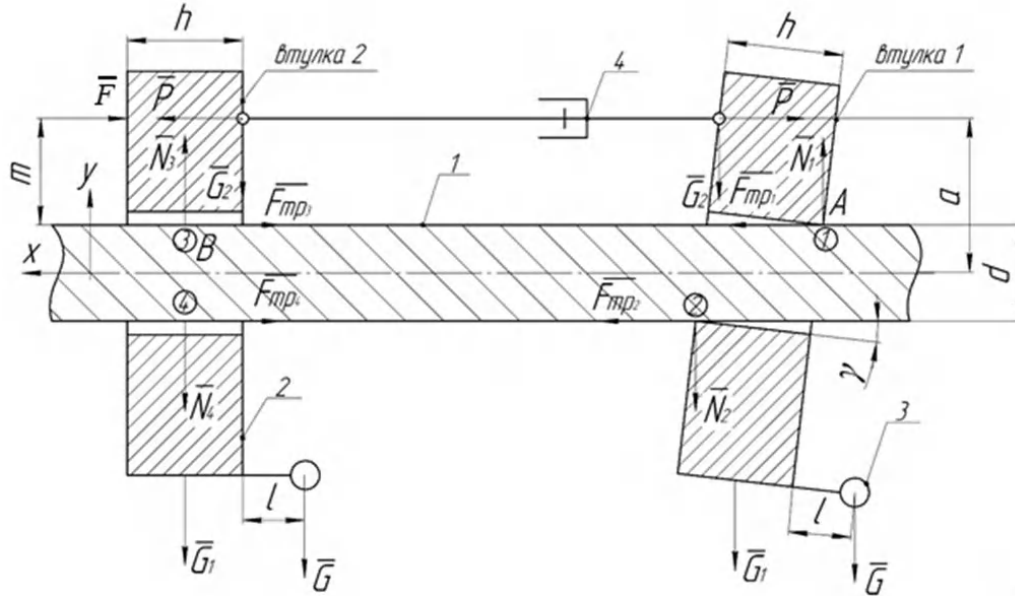


Рис. 2. Расчетная схема мобильного робота:
1 – стержень; 2 – втулка; 3 – груз; 4 – линейный привод

В координатной плоскости XOY составляют две системы уравнений (1), (2), описывающие равновесие каждой из втулок по отдельности; учитывается малость угла γ наклона втулки.

Для первой втулки система уравнений имеет вид:

$$\begin{cases} fN_1 + fN_2 - P = 0, \\ N_1 - N_2 - G - G_1 - G_2 = 0, \\ -P\left(a - \frac{d}{2}\right) + G_2h - fN_2d + G_1\frac{h}{2} - Gl + N_2h = 0; \end{cases} \quad (1)$$

для второй втулки:

$$\begin{cases} P - f_1N_3 - f_1N_4 - F = 0, \\ N_3 - N_4 - G - G_1 - G_2 = 0, \\ P\left(a - \frac{d}{2}\right) - G_2\frac{h}{2} - G\left(l + \frac{h}{2}\right) + f_1N_4d - Fm = 0, \end{cases} \quad (2)$$

где G – вес груза на втулке; G_1 – вес втулки; G_2 – вес линейного привода; N_1 – сила реакции опоры в точке 1; N_2 – сила реакции опоры в точке 2; N_3 – сила реакции опоры в точке 3; N_4 – сила реакции опоры в точке 4; P – горизонтальная составляющая реакции шарнира крепления привода, равняется действующей со стороны

привода силе при движении робота; F – сила сопротивления, действующая со стороны препятствия на втулку или со стороны инструмента, который может быть установлен на втулке для совершения определенной технологической операции; f – коэффициент трения первой втулки; f_2 – коэффициент трения второй втулки; h – ширина втулки; l – расстояние от груза до втулки; a – расстояние от места крепления привода до середины стержня; d – диаметр стержня; m – расстояние от силы, действующей со стороны препятствия до стержня; угол $\gamma \approx 0$ град.

Из уравнения (1) определяется необходимая сила P , действующая со стороны привода, для заклинивания одной из втулок в зависимости от параметров рассматриваемой механической системы:

$$P = -\frac{Gf(df - 2l - h) + G_1df^2 + G_2(df + h)}{h - 2af}. \quad (3)$$

Из уравнения (2) определяется максимальное значение силы F , действующей со стороны препятствия, которую может преодолеть втулка, находящаяся в движении:

$$F = -\frac{G(h + 2l + df_1) + G_1df_1 + G_2(h + df_1) - 2Pa}{d + 2m}. \quad (4)$$

Имитационное моделирование

Рассматривается робототехническая система, соответствующая схеме, представленной на

рис. 1, с параметрами: $G_1 = 3,92$ Н; $G_2 = 3$ Н; $F = 0$ Н; $a = 0,065$ м; $h = 0,030$ м; $d = 0,030$ м; $l = 0,015$ м; $d = 0,03$ м; $m = 0,020$ м.

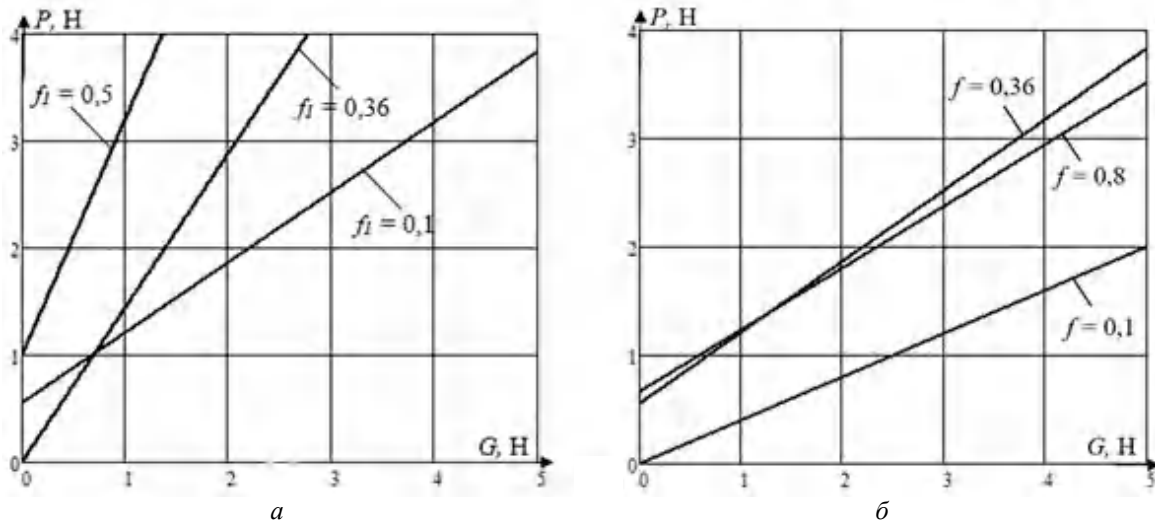


Рис. 3. Зависимость силы, действующей со стороны привода P , от веса дополнительного груза G :
 а – при $f = 0,36$; б – при $f_1 = 0,1$

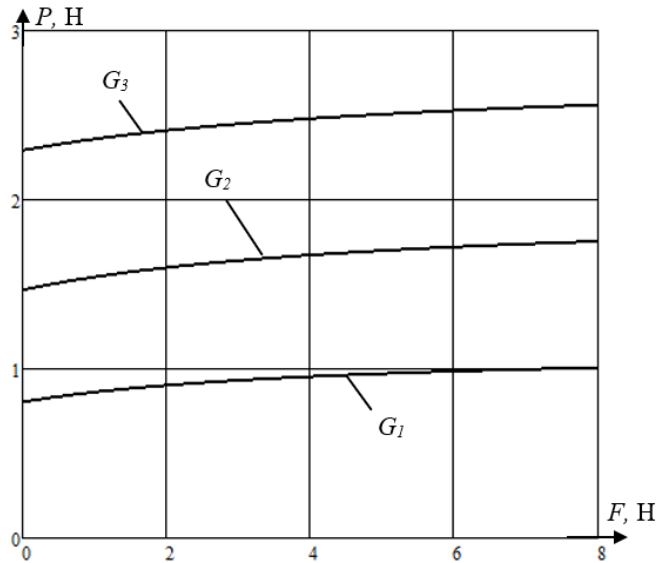


Рис. 4. Зависимость силы, действующей со стороны привода P , от силы сопротивления F :
 $G_1 = 3$ Н; $G_2 = 5$ Н; $G_3 = 7$ Н; $f = 0,36$; $f_1 = 0,1$

Начальные условия

Начальные условия	
G_1 , Н – вес втулки	3,92
G_2 , Н – половина веса привода	2,5
f – коэффициент трения зацепления	0,36
f_1 – коэффициент трения движения	0,1
a , м – расстояние от места крепления привода до середины стержня	0,05
h , м – ширина втулки	0,03
d , м – диаметр стержня	0,03
m , м – расстояние от силы, действующей со стороны препятствия до стержня	0,035
l , м – расстояние от груза до втулки	0,015

Особенностью конструкции втулки является то, что внутренняя поверхность, периодически взаимодействующая с несущей протяженной конструкцией, например, стержнем, имеет различную шероховатость за счет гладкого участка в средней части внутренней поверхно-

сти втулки, коэффициент которого равен f_1 , и грубо шероховатого в периферийной зоне с коэффициентом трения f , обеспечивая как заклинивание, так и скольжение втулки относительно несущей конструкции, необходимое для перемещения корпуса робота.

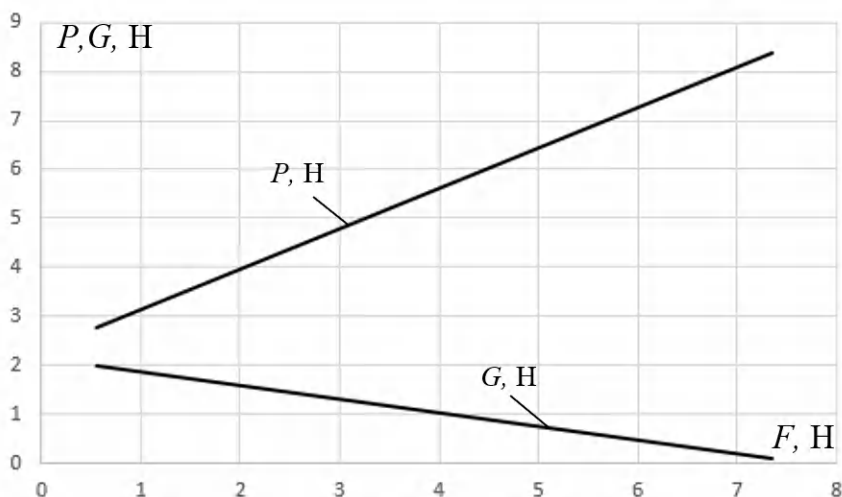


Рис. 5. Зависимость силы, действующей со стороны привода P , и веса дополнительного груза G от силы сопротивления F

Полученные зависимости необходимы для определения конструктивных особенностей робота на этапе проектирования, например: модель линейного привода, геометрические параметры робота, вес дополнительного груза и так далее.

Принцип движения

На рис. 6 представлен испытательный стенд мобильного робота с двигателями, работающими на эффекте периодического заклинивания спроектированный на основе 3d-модели.

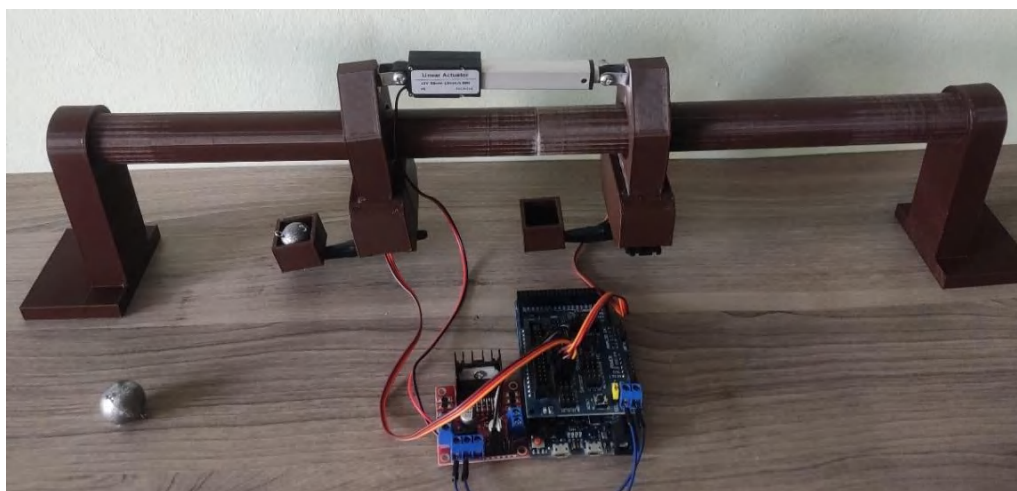


Рис. 6. Испытательный стенд

Система управления мобильного робота состоит из платы Arduino и драйвера L298N. Необходимое питание составляет 12 Вт. Программа управления написана на среде разработки Arduino IDE; на данный момент управление может осуществляться при помощи

компьютера или Bluetooth модуля.

На рис. 7–10 проиллюстрирован алгоритм последовательного управления приводом курсового движения и приводами изменения положения дополнительных масс на втулках, обеспечивающих их попеременное заклинивание.

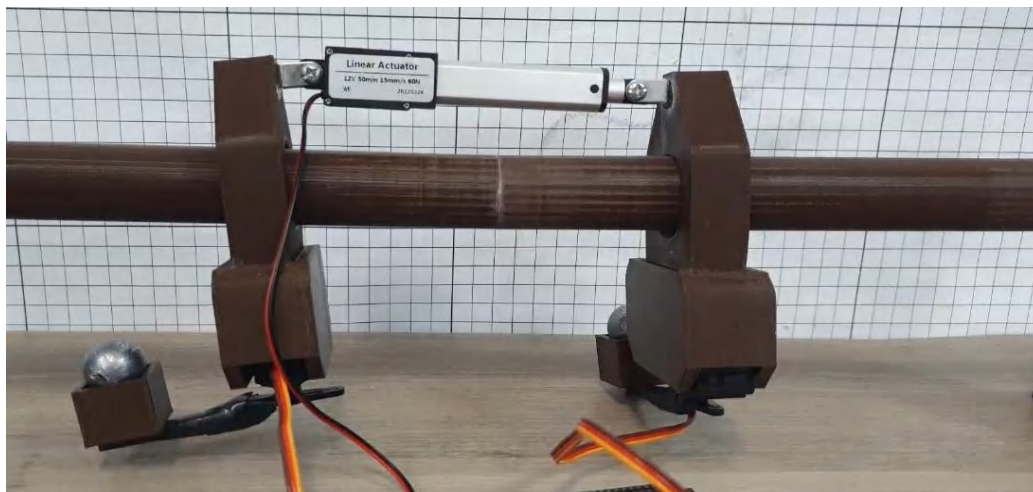


Рис. 7. Левая втулка закинена и неподвижна, правая втулка начинает движение

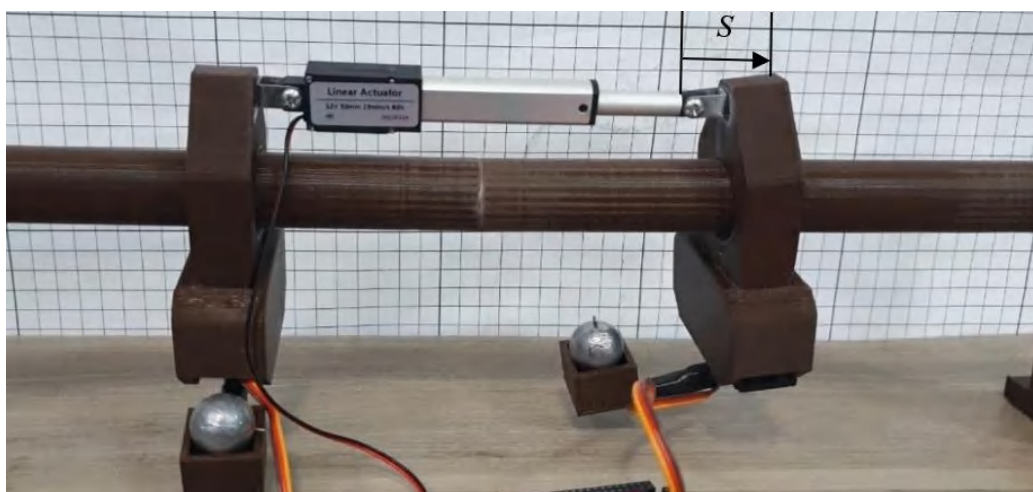


Рис. 8. Дополнительные грузы синхронно меняют положение при выключенном приводе курсового движения, далее правая втулка закинивается за счет работы привода курсового движения

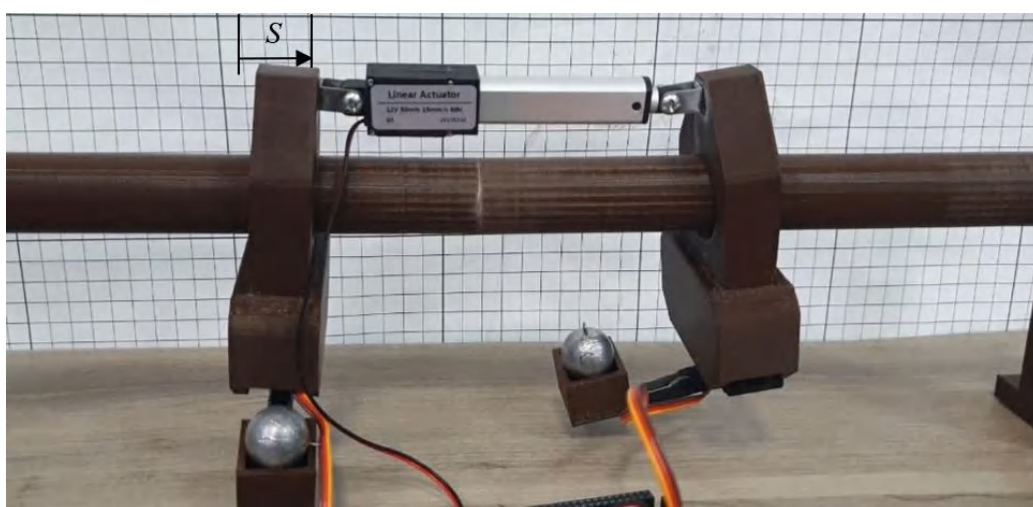


Рис. 9. Правая втулка закинена и неподвижна, левая втулка заканчивает движение

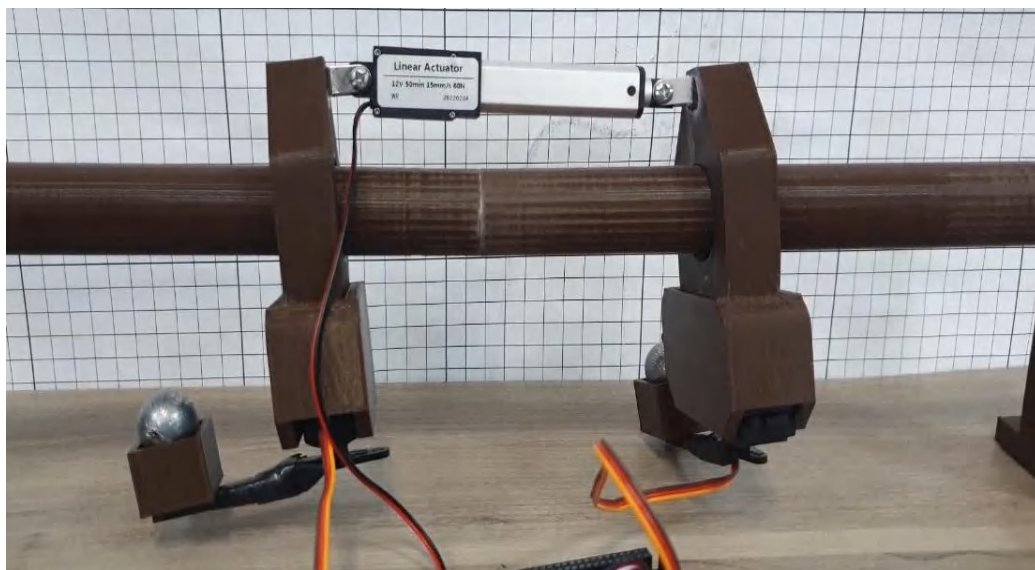


Рис. 10. Дополнительные грузы синхронно меняют положение при выключенном приводе курсового движения, далее левая втулка заклинивается за счет работы привода курсового движения

Далее цикл повторяется; таким образом происходит движение робота.

Заключение

Представлена математическая модель, описывающая положение мобильного робота. Определены сила, действующая со стороны привода P , и вес дополнительного груза G в зависимости от значения силы сопротивления F . Представлены модель и действующий макет робота с двигателями, работающими на эффекте периодического заклинивания.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Малолетов, А. В. Оптимизация структуры, параметров и режимов движения шагающих машин со сдвоенными двигателями / А. В. Малолетов, Е. С. Брискин ; ВолгГТУ. – Волгоград, 2015. – 176 с.
2. Сравнительный анализ колесных, гусеничных и шагающих машин / Е. С. Брискин, В. В. Чернышев, А. В. Малолетов, Н. Г. Шаронов // Робототехника и техническая кибернетика. – 2013. – № 1 (1). – С. 6–14.
3. Концепция проектирования, динамика и управление движением шагающих машин. Ч. 2. Динамика движения шагающих машин серии «Восьминог» / Е. С. Брискин,

В. В. Чернышев, В. В. Жога, А. В. Малолетов, Н. Г. Шаронов, Н. Е. Фролова // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2005. – № 6. – С. 19–26.

4. Parker, R. Robotics in forestry / Richard Parker, Karen Bayne, Peter Clinton // New Zealand Journal of Forestry. – № 60 (4). – 2016. – Pp. 8–14.

5. Голубев, Ю. Ф. Управление инсектоморфным роботом при залезании на вершину вертикального угла и при движении по приставной лестнице / Ю. Ф. Голубев, В. В. Корянов // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2008. – № 1. – С. 148–157.

6. Арыканцев, В. В. Реверсивный шаговый подъемник заклинивающего типа / В. В. Арыканцев, М. Г. Матвейчук, А. В. Бандурко // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2020. – № 9 (244). – С. 7–10.

7. Яцун, С. Ф. Вибрационный мобильный робот для движения по вертикальной ферромагнитной стене / С. Ф. Яцун, А. А. Черепанов // Естественные и технические науки. – 2010. – № 6 (50). – С. 400–401.

8. Платформа робота вертикального перемещения / А. Н. Щербина, В. А. Зацепин, В. Е. Баранов, А. Г. Леви, С. И. Юрков, А. Г. Кокорин // Известия Челябинского научного центра УрО РАН. – 2003. – № 3. – С. 44–48.

9. Градецкий, В. Г. Роботы вертикального перемещения / В. Г. Градецкий, М. Ю. Рачков ; Рос. акад. наук, Отделение проблем машиностроения, механики и процессов управления, Ин-т проблем механики. – М.: ИПМ, 1997. – 223 с.

УДК 004.896+007.3+007.52+62–52+681.5
DOI 10.35211/1990-5297-2023-4-275-29-33

А. С. Быков, А. М. Кошман, А. В. Леонард

РАЗРАБОТКА И СОВМЕСТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ О СРЕДЕ, ПОЛУЧЕННЫХ 2D-LIDAR

Волгоградский государственный технический университет

alexanderbs00@mail.ru, artkoshman@gmail.com, alex-leonard@yandex.ru

В статье рассматривается вопрос разработки и совместного моделирования алгоритмов по сбору данных о недетерминированной статичной среде, идентификации препятствий и аппроксимации их образов в виде окружностей.

Ключевые слова: мобильный робот, техническое зрение, компьютерное зрение, идентификация препятствий, LIDAR.

A. S. Bykov, A. M. Koshman, A. V. Leonard

DEVELOPMENT AND JOINT MODELING OF ALGORITHMS FOR PROCESSING ENVIRONMENT DATA OBTAINED BY 2D-LIDAR

Volgograd State Technical University

The article deals with the development and joint modeling of algorithms for collecting data on a non-deterministic static environment, identifying obstacles and approximating their images in the form of circles.

Keywords: mobile robot, technical vision, computer vision, obstacle identification, LIDAR.

Введение

В настоящее время наблюдается тенденция активного внедрения мобильных роботизированных систем в практическую деятельность человека. Для автоматического функционирования мобильных роботов в условиях недетерминированной среды необходима интеграция системы управления с сенсорными устройствами, обеспечивающими мониторинг оперативного пространства робота на наличие препятствий и их идентификацию. Анализ статей показывает, что существует большое разнообразие средств технического (компьютерного) зрения [1, 2]. К наиболее функциональным устройствам технического зрения можно отнести стереопары и лидары (LIDAR). Удобство использования лидаров заключается в непосредственном получении массива точек, характеризующих форму препятствий, на основе дальности отражаемых лазерных лучей и углов их излучения.

1. Постановка задачи

Необходимо разработать алгоритмы, которые моделируют сбор информации 2D-лидаром о случайной статичной среде в виде координат точек отражения лучей, обеспечивают идентификацию препятствий в оперативном пространстве робота и их аппроксимацию в виде геометрических примитивов – окружностей.

2. Моделирование сбора информации о среде 2D-лидаром

Образ случайной 2D-среды задается в виде предварительно созданного рисунка, в котором препятствия в произвольном виде изображаются на белом фоне линиями или фигурами со сплошной заливкой. Задается дальность сканирующего луча, угловой шаг поворота излучателя-детектора и текущее положение центра лидара. Из центра лидара строятся лучи, моделирующие лазерные (рис. 1, а).

Признаком обнаружения границы препятствия в модели является обнаружение пикселя заданного цвета на пути луча. Координаты точки, в которой обнаружен пиксель, записываются в единый массив, а построение луча прекращается. Происходит изменение текущего угла поворота излучателя-детектора на величину углового смещения, и процесс повторяется снова. В случае, если длина луча достигла предела дальности действия лидара, отрисовка лазерного луча останавливается и изображается линия с длиной, равной дальности действия лидара. Результатом работы описанного алгоритма является единый массив координат точек, лежащих на границах препятствий (рис. 1, б).

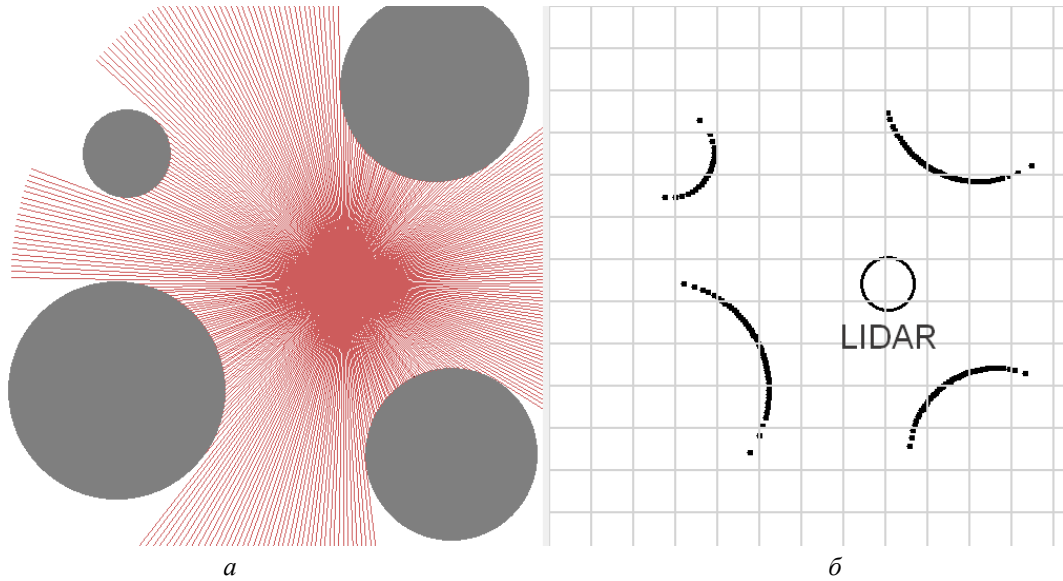


Рис. 1. Компьютерное моделирование процесса сканирования среды: *а* – исходное представление препятствий и зона действия лидара; *б* – массив точек соприкосновений лучей лидара с границами препятствий

3. Построение алгоритма идентификации препятствий

Идентификация (в рамках данной статьи) предполагает выявление групп точек в едином массиве, соответствующих первичным изображениям препятствий, с использованием особых признаков. Анализ существующих алгоритмов

идентификации показывает, что в решаемой задаче рационально применить вид алгоритмов на основе иерархической кластеризации с использованием агломеративных методов [3]. Этот вид алгоритмов позволяет эффективно разбивать множество точек на кластеры и при этом достаточно прост в реализации [4].

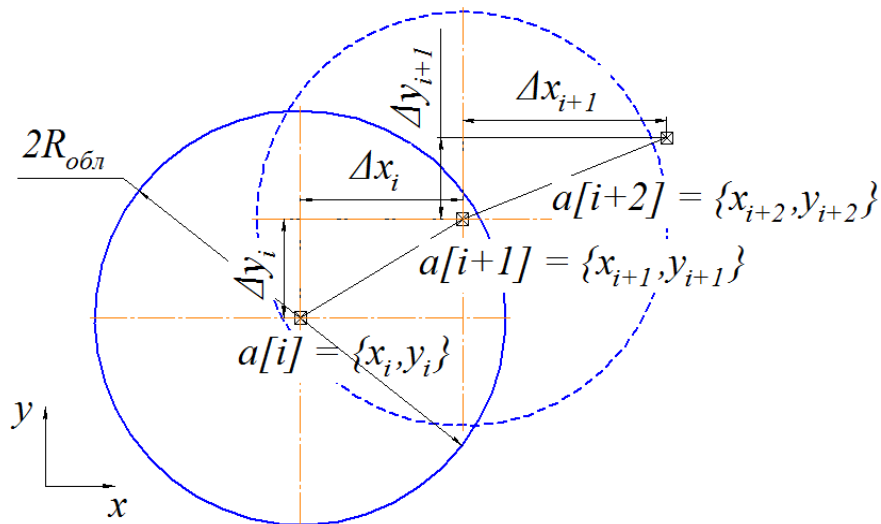


Рис. 2. Расчетная схема кластеризации исходного массива точек

Для предлагаемого варианта идентификации препятствий характерным признаком кластеризации будет являться расстояние между двумя соседними точками (рис. 2). Установление принадлежности пары координат точки конкретному препятствию основано на условии (особом признаке) соответствия:

$$\sqrt{\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2} \leq R_{\text{обл}}.$$

Формирование группы точек, соответствующих отдельному препятствию, продолжается до тех пор, пока выполняется указанное условие. Радиус области соответствия $R_{\text{обл}}$ зависит

от габаритных размеров мобильного робота (радиуса описанной окружности R) и установленного значения коэффициента k для безопасного прохождения роботом между двумя соседними

преградами. Величина радиуса $R_{обл}$ области ответственности определяется по формуле:

$$R_{обл} = k \cdot 2R, k > 1.$$

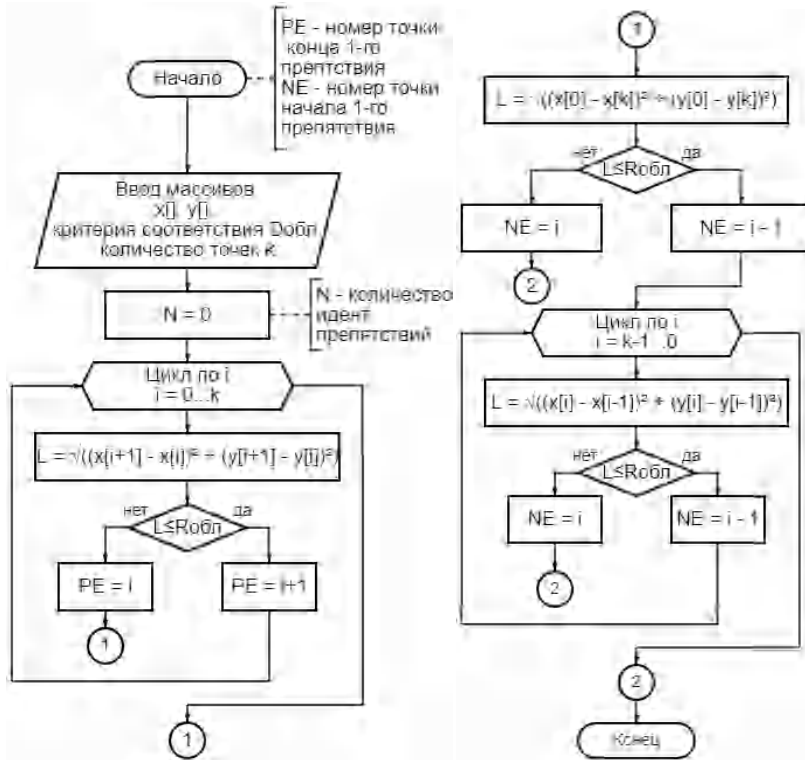


Рис. 3. Блок-схема идентификации первого препятствия

Для идентификации препятствий предлагается следующий алгоритм кластеризации исходного массива точек, полученных в результа-

те соприкосновения лучей лидара с границами препятствий (рис. 3, 4).

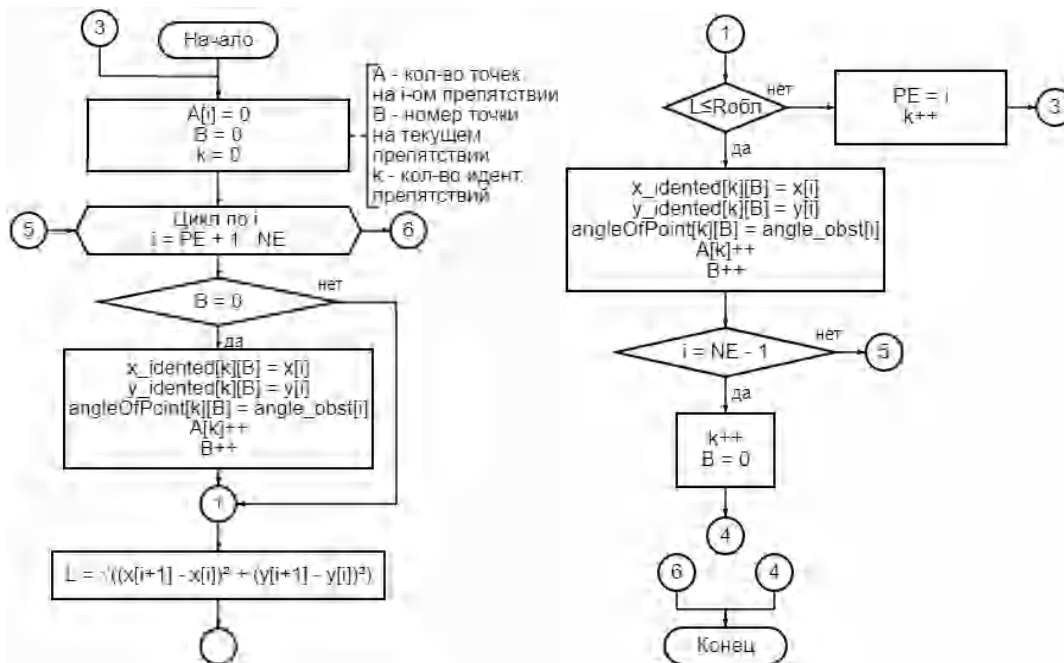


Рис. 4. Блок-схема идентификации остальных препятствий

4. Построение алгоритма аппроксимации образа препятствия

Алгоритм аппроксимации содержит в себе следующие этапы. На первом этапе для каждой i -й группы точек из k групп (полученных в результате кластеризации-идентификации изображений препятствий) производится определение координат $x[i,m]$, $y[i,m]$ точки $A[i,m]$, которая имеет максимальное удаление от отрезка, соединяющего первую $A[i,1]$ и последнюю $A[i,n]$ точки в группе. Координаты точек рассчитываются в локальной системе координат, связанной с лидаром. На втором этапе для каждой группы точек определяются координаты центров аппроксимирующих окружностей $x_R[i]$, $y_R[i]$. Центры окружностей устанавливаются в результате пересечения срединных перпендикуляров, построенных на сторонах треугольников, вершинами которых являются первая $A[i,1]$, последняя $A[i,n]$ и максимально

удаленная $A[i,m]$ точки в каждой группе. На завершающем этапе производится расчет радиусов аппроксимирующих окружностей:

$$R[i] = \sqrt{(x_R[i] - x[i,m])^2 + (y_R[i] - y[i,m])^2},$$

значения которых определяются через координаты их центров и точек максимального удаления. Производится пересчет локальных координат центров $x_R[i]$, $y_R[i]$ в координаты глобальной (неподвижной) системы координат:

$$x_R^G[i] = x_{LIDAR}^G + x_R[i], \quad y_R^G[i] = y_{LIDAR}^G + y_R[i].$$

Результаты компьютерного моделирования совместной работы алгоритмов: по сбору информации 2D-лидаром о случайной статичной среде в виде массива координат точек отражения лазерных лучей; идентификации препятствий (кластеризации массива точек) и их аппроксимации в виде геометрических примитивов – окружностей – представлены на рис. 5–7.

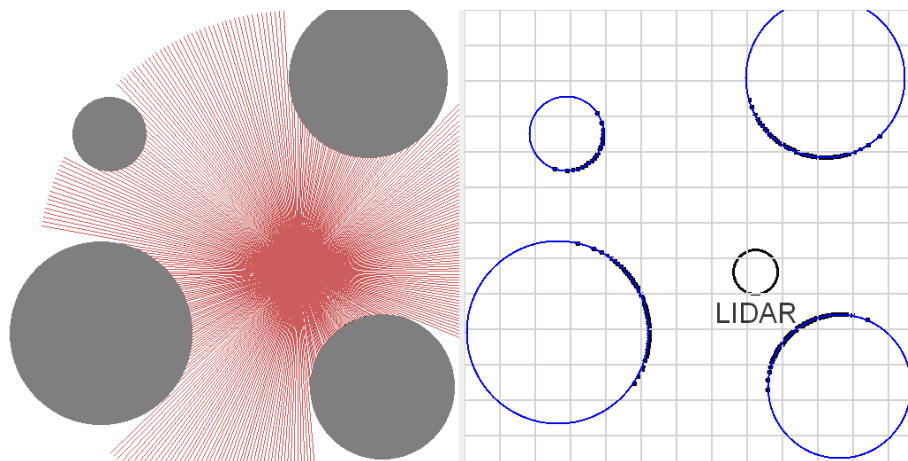


Рис. 5. Результат работы алгоритмов: препятствия в форме окружностей

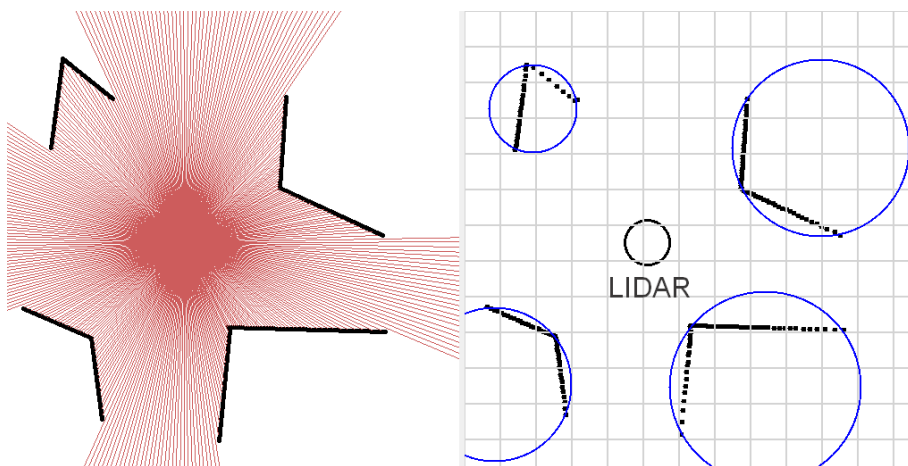


Рис. 6. Результат работы алгоритмов: препятствия в форме углов

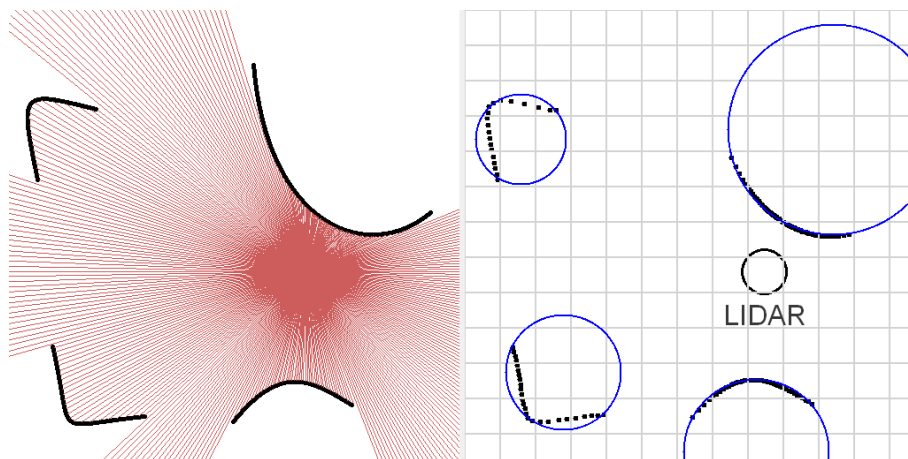


Рис. 7. Результат работы алгоритмов: препятствия в форме кривых линий

Заключение

Анализ приведенных результатов показывает, что совместная работа предложенных алгоритмов обеспечивает представление исходных препятствий в виде 2D-геометрических примитивов, т. е. исходные препятствия оказываются вписанными в аппроксимирующие окружности. Однако для препятствий, которые имеют изображение в виде отрезков прямых, требуется модификация аппроксимирующего алгоритма. Например, для коротких отрезков аппроксимирующая окружность может быть построена с диаметром, равным длине отрезка и центром в его середине. Таким образом, представленные алгоритмы работоспособны и могут быть применены на практике. В частности, указанные алгоритмы могут быть использованы совместно с методами автоматического планирования движения мобильных роботов [5, 6] для исследования и создания автоматических систем управления.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Горячкин, Б. С. Компьютерное зрение / Б. С. Горячкин, М. А. Китов // E-Scio. – 2020. – № 9(48). – С. 317–345. – EDN EBYPIU.

2. Лю, В. Методы планирования пути в среде с препятствиями (обзор) / В. Лю // Математика и математическое моделирование. – 2018. – № 1. – С. 15–58. – DOI 10.24108/mathm.0118.0000098. – EDN YWFAYD.

3. Разработка эффективного алгоритма иерархической кластеризации / А. П. Кирпичников, И. С. Ризаев, Э. Г. Тахавова, Н. И. Сафаров // Вестник технологического университета. – 2019. – Т. 22, № 10. – С. 117–122. – EDN PGBUJD.

4. Бучацкая, В. В. Сравнительный анализ алгоритмов кластеризации данных / В. В. Бучацкая, Е. В. Макрищева // Информационные системы и технологии в моделировании и управлении : Сборник трудов V Международной научно-практической конференции. Ялта, 20–22 мая 2020 года. – Ялта : Ариал, 2020. – С. 131–136. – EDN DPUSEU.

5. Леонард, А. В. Планирование движения наземного робота с обходом стационарного препятствия при заданных: начальных и конечных координатах, скоростях и оперативном времени ($VC/APF+BC_{\tau}^1$). Ч. I. Теория / А. В. Леонард // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 9(268) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2022. – С. 34–42. – DOI 10.35211/1990-5297-2022-9-268-34-42. – EDN HFNLUU.

6. Леонард, А. В. Планирование движения наземного робота с обходом стационарного препятствия при заданных: начальных и конечных координатах, скоростях и оперативном времени ($VC/APF+BC_{\tau}^1$). Ч. II. Результаты / А. В. Леонард // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 9(268) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2022. – С. 42–48. – DOI 10.35211/1990-5297-2022-9-268-42-48. – EDN AYCRWQ.

УДК 621.8:62-5

DOI 10.35211/1990-5297-2023-4-275-34-39

*Р. Р. Даминдаров¹, А. В. Малолетов^{1,2}***ПРИНЦИПЫ УПРАВЛЕНИЯ ТРОСОВЫМ РОБОТОМ
С ПОМОЩЬЮ ЭКЗОСКЕЛЕТА***¹ Университет Иннополис² Волгоградский государственный технический университет

r.damindarov@innopolis.university

В статье предложен метод управления тросовым роботом на основе экзоскелета верхних конечностей. Предложена архитектура системы взаимодействия человек-робот, описаны функциональные блоки, структуры управляющего и управляемого устройства. Рассмотрены алгоритмы детектирования жестов управления и принятия решения о начале отсчета перемещения инструмента в декартовом пространстве и его ориентации.

Ключевые слова: тросовый робот, экзоскелет, телеуправление.

*R. R. Damindarov¹, A. V. Maloletov^{1,2}***PRINCIPLES OF CONTROLLING A ROPE ROBOT
USING AN EXOSKELETON**¹ Innopolis University² Volgograd State Technical University

The article proposes a method for controlling a rope robot based on an upper limb exoskeleton. The architecture of the human-robot interaction system is proposed, functional blocks, structures of the control and controlled device are described. Algorithms for detecting control gestures and deciding on the beginning of the tool movement in Cartesian space and its orientation are considered.

Keywords: cable robot, exoskeleton, remote control.

Введение

Известно большое количество различных интерфейсов для взаимодействия человека и робота. Начиная от самых простых и обыденных устройств ввода для компьютеров, заканчивая сложными устройствами для удаленного управления манипуляторами с силовой обратной связью и систем управления экзоскелетами, которые должны обеспечивать движение экзоскелета совместно с движениями человека. Несмотря на развитие технологий для взаимодействия человека и машин, в том числе с использованием виртуальной и дополненной реальности [1], создание интуитивно понятного интерфейса для взаимодействия человека с роботом остается непростой задачей [2]. В вопросах удаленного управления роботами интересна задача выбора управляющего устройства и сопоставления его движений с управляемым роботом. Если робот относительно прост и легкодоступен, то в качестве управляющего устройства скорее всего будет выбран такой же робот. В этом случае кинематика обоих устройств будет идентична [3], и можно будет избежать множества проблем. В случае если управляю-

щий и управляемый роботы имеют различную кинематику [4], возникает задача разработки интерфейса их взаимодействия.

В этой статье рассматриваются методы прямого управления тросовым роботом с помощью экзоскелета.

**1. Описание системы
удаленного управления**

Схема системы удаленного управления представлена на рис. 1 и состоит из следующих блоков: оператор, управляющее устройств, блок обработки и передачи данных, управляемое устройство. Оператор, воздействуя на управляющее устройство, изменяет его состояние. Данные о состоянии управляющего устройства передаются в блок обработки и затем на управляемое устройство.

1.1. Управляющее устройство

В качестве управляющего устройства используется экзоскелет верхних конечностей от компании «Андроидная Техника»; общий вид устройства представлен на рис. 2. Выбор обусловлен наличием возможности копирования движений верхних конечностей оператора вплоть до мелкой моторики пальцев.

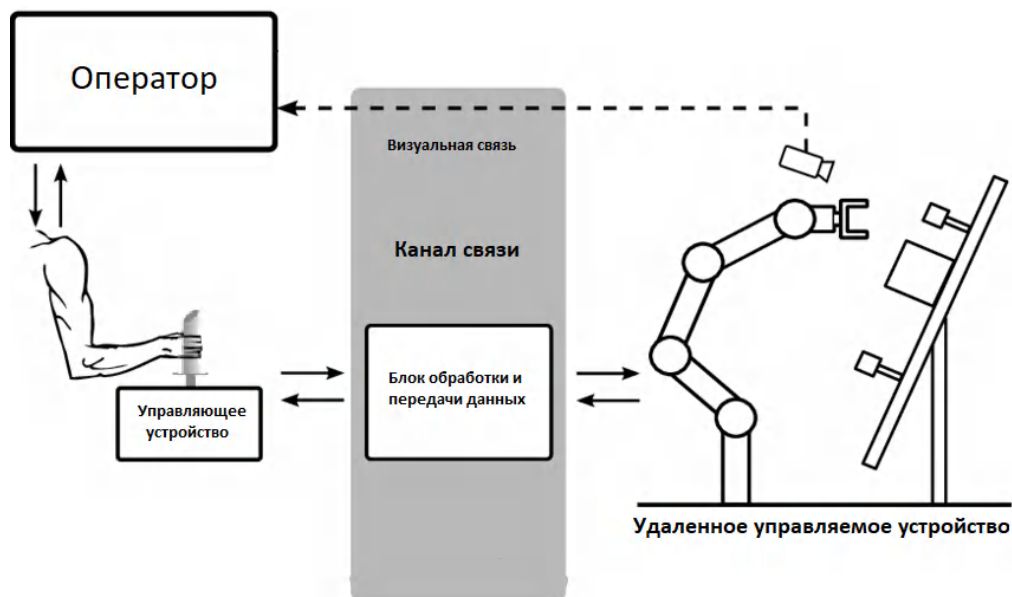


Рис. 1. Схема системы телеуправления



Рис. 2. Общий вид экзоскелета

Рычажный механизм экзоскелета состоит из соединенных между собой вращательной и поступательной пар звеньев. Движения звеньев в механизме обеспечиваются естественными движениями человека. Каждая из рук экзоскелета состоит из семи шарниров, три из которых активны и имеют приводы, рис. 3. Перчатки, надетые на руки, позволяют считывать и пере-

давать движения каждого пальца; используя эти данные, можно распознавать жесты мелкой моторики, что значительно расширяет возможности системы удаленного управления.

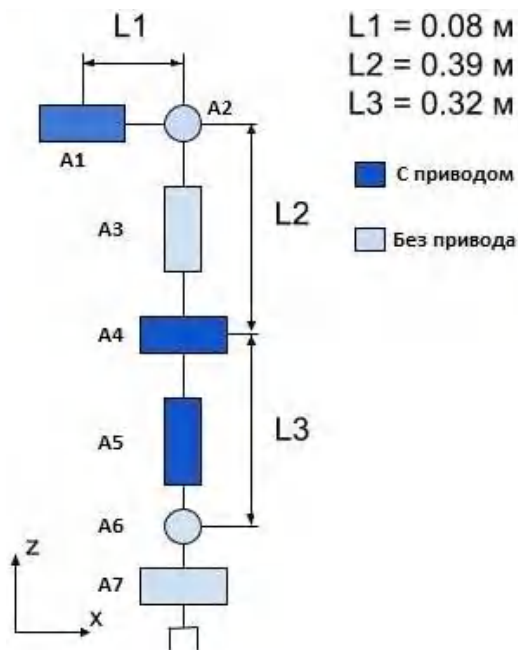


Рис. 3. Кинематическая схема одной руки экзоскелета

1.2. Тросовый робот

Тросовые роботы – манипуляторы с параллельной структурой. Основная особенность таких механизмов – это использование тросов для управления положением и ориентацией конечного инструмента, который можно представить в виде мобильной платформы [5], с установ-

ленным на ней различным оборудованием – от классического захвата до экструдера для бетонной смеси [6]. В работе используется тросовый манипулятор с восемью тросами, обеспе-

чивающий произвольное перемещение и ориентацию мобильной платформы в рабочем пространстве робота. Схема манипулятора представлена на рис. 4.

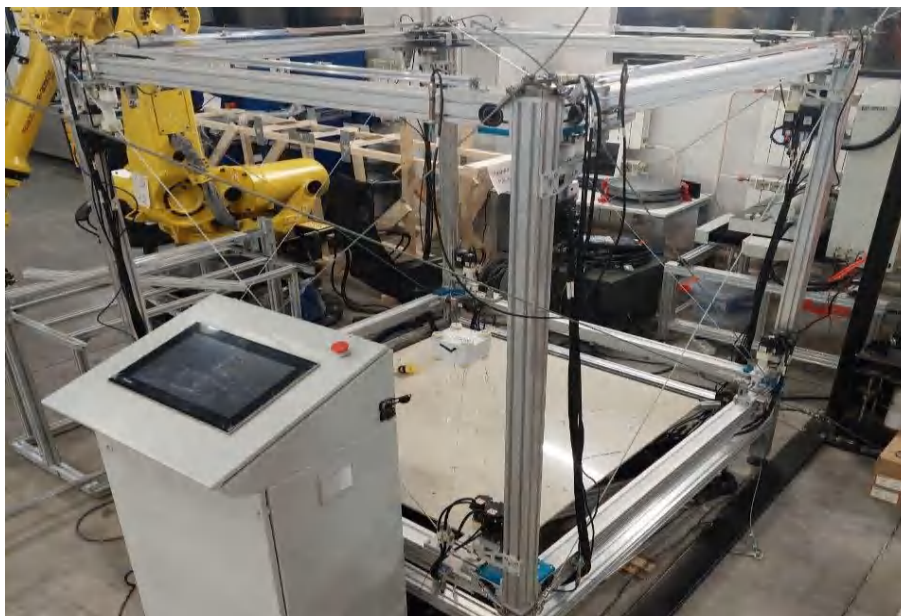


Рис. 4. Лабораторная модель тросового манипулятора

В исследовании делается акцент на алгоритмах определения управляющих сигналов со стороны экзоскелета; при этом считается, что управление мобильной платформы в рабочем поле тросового робота уже реализовано с необходимой точностью [7].

1.3. Блок обработки и передачи данных

Блок обработки и передачи данных включает в себя персональный компьютер и роутер. Экзоскелет передает данные по беспроводной сети с помощью установленного на нем микрокомпьютера, блок обработки принимает пакет данных о состоянии экзоскелета. В нем хранятся все углы каждого из шарниров экзоскелета в формате сетевого пакета. Состояние каждого шарнира описано переменной с плавающей точкой. После передачи каждое значение преобразуется путем вычитания заводского смещения и умножения на разрешающий коэффициент. На основе данных, полученных из вышеописанного пакета, принимается решение о начале перемещения конечного инструмента тросового робота и о величине перемещения.

2. Метод управления

Метод управления тросовым роботом с помощью экзоскелета заключается в определении жестов человека с надетым экзоскелетом и трак-

товке их как перемещения и поворота твердого тела, зажатого в пальцах. Мобильная платформа при этом повторяет движение этого тела.

Так как в качестве главной цели ставится создание простого и интуитивного для человека интерфейса управления, то необходимо основывать алгоритм на базовых движениях, привычных для человека. Предполагая, что размеры тросового робота сравнимы с рукой человека, можно представить эксперимент, в котором человек подведя руку к точке, где на данный момент находится мобильная платформа, и схватив ее, может изменять ее ориентацию и положение. Именно подобного рода управление наиболее интуитивно понятно для человека, так как в обыденной жизни и в гипотетическом эксперименте используется операция захвата и перемещения с помощью рук. Очевидно, что этот метод может быть использован для удаленного управления, в котором человек с экзоскелетом перемещает виртуальную модель платформы. Также метод может быть легко обобщен для управления тросовыми роботами больших или меньших размеров, путем использования соответствующего масштабного коэффициента.

На практике вместо виртуальной модели мобильной платформы удобно использовать

Algorithm 1: Алгоритм детектирования захвата из данных экзоскелета

```
1 Function (socket):
  Input: Ссылка на экземпляр сетевого класса
        общения с экзоскелетом
  Output: Состояние захвачен кубик или нет,
          значения смещения если захват был
          произведен
2  Отправка запроса на получение сетевого
   пакета описывающего состояние
   экзоскелета;
3  data = Получение ответного сетевого пакета
   от экзоскелета;
4  Состояние первого пальца экзоскелета f1 =
   преобразование из сетевого пакета в число с
   плавающей точкой;
5  Состояние второго пальца экзоскелета f2 =
   преобразование из байт в число с
   плавающей точкой;
6  if Если f1 > 0.78 then
7     Глобальная логическая переменная
   детектирования захвата перемещения в
   декартовом пространстве = True;
8     Вычисление положения конечного
   элемента экзоскелета с помощью прямой
   кинематики;
9     Запись положения экзоскелета;
10    Сохранение смещений относительно
   записанной в момент первого
   детектирования захвата точки по
   алгоритму 3.
11 else
12    Глобальная логическая переменная
   детектирования захвата перемещения в
   декартовом пространстве = False
13 if Если f2 > 0.78 then
14    Глобальная логическая переменная
   детектирования захвата изменения
   ориентации = True;
15    Вычисление ориентации конечного
   элемента экзоскелета с помощью прямой
   кинематики;
16    Запись положения экзоскелета;
17    Сохранение смещений относительно
   записанной в момент первого
   детектирования захвата точки по
   алгоритму 2;
18 else
19    Глобальная логическая переменная
   детектирования захвата изменения
   ориентации = False
```

Рис. 5. Полный алгоритм работы системы

небольшой кубик, чтобы оператор, работая в экзоскелете, мог ощущать объект, на который воздействует. В таком случае необходимо отслеживать моменты захвата модели мобильной платформы и ее освобождения. В течение всего времени работы системы блок обработки и пе-

редачи данных обменивается сообщениями с экзоскелетом и детектирует изменения его состояния. Углы пальцев на датчиках положения экзоскелета изменяются от 0 до π , поэтому в качестве порога для детектирования захвата выбирается половина рабочего диапазона.

Algorithm 2: Алгоритм вычисления относительного изменения ориентации

```

1 Function (data):
  Input: Пакет байт описывающий состояние
        экзоскелета
  Output: Матрица относительного изменения
          ориентации
2 Массив углов шарниров экзоскелета  $angs$  =
  преобразование данных из пакета байт в
  числа с плавающей точкой;
3 Матрица  $R$  = решение прямой кинематики
  на основе данных об углах шарниров  $angs$ ;
4 Возврат элементов матрицы  $R$  с номерми от
   $R_{11}$  до  $R_{33}$ ;

```

Рис. 6. Алгоритм вычисления относительного изменения ориентации

Algorithm 3: Алгоритм вычисления относительного изменения координаты

```

1 Function (data):
  Input: Сетевой пакет, описывающий
        состояние экзоскелета
  Output: Матрица относительного изменения
          ориентации
2 Массив углов шарниров экзоскелета  $angs$  =
  преобразование данных из сетевого пакета в
  числа с плавающей точкой;
3 Матрица  $R$  = решение прямой кинематики
  на основе данных об углах шарниров  $angs$ ;
4 Возврат элементов матрицы  $R$  с номерми
   $R_{14}$ ,  $R_{24}$ ,  $R_{34}$ ,  $R_{44}$ ;

```

Рис. 7. Алгоритм вычисления относительного изменения координаты

В момент захвата кубика записывается положение экзоскелета и ведется отсчет перемещения от точки захвата, параллельно транслируется смещение на тросового робота. Затем в момент разжатия руки оператора, отчет и передача координат заканчивается. Алгоритм работы представлен на рис. 5. Для упрощения работы с системой предлагается создать два жес-

та управления. Первый означает начало изменения координаты робота, а второй – ориентации. Такой подход позволит точнее позиционировать мобильную платформу робота, так как при задании ориентации рука в экзоскелете может произвольно перемещаться в декартовых координатах, тем самым внося неточности в положение платформы.

В силу особенностей строения экзоскелета определить ориентацию кубика, зажато в ладони оператора, из данных, полученных напрямую, не представляется возможным. Принцип поиска относительного изменения ориентации аналогичен вышеописанному

методу поиска изменения декартовой коор-

$$R = R_x(\alpha_1)T_x(L_1)R_y(\alpha_2)T_y(L_2)R_z(\alpha_3)R_x(\alpha_4)R_y(\alpha_5)T_z(L_3)R_x(\alpha_6)R_y(\alpha_7), \quad (1)$$

где $R_x, R_y, R_z, T_x, T_y, T_z$ – матрицы однородных преобразований поворотов по осям x, y, z и смещений по осям x, z соответственно; α_i – угол поворота на i -м шарнире; L_1, L_2, L_3 – смещения в шарнирах, показанные на рис. 3. Пусть через R_0 обозначается значение матрицы R в момент детектирования второго жеста управления. Тогда в каждый последующий момент времени, при решении задачи прямой кинематики, вычисляется значение матрицы R_m . Теперь для получения относительного изменения ориентации достаточно решить уравнение (2). В силу того, что для матриц однородных преобразований всегда существуют обратные матрицы, такое решение не представляет сложностей.

$$R_m = R_0 R_{reg}. \quad (2)$$

Полученная матрица относительного смещения R_{reg} отправляется в систему управления тросовым роботом и используется для вычисления требуемого смещения и изменения ориентации мобильной платформы тросового робота. При необходимости элементы матрицы R_{reg} , определяющие смещение, умножаются на соответствующий масштабный коэффициент.

Заключение

В статье предложена новая модель взаимодействия человека и тросового робота с помощью экзоскелета. Описаны методы прямого управления тросовым роботом, детектирования базовых жестов и принятие решений о выполнении перемещения, смены ориентации или де-

динаты. Ориентация для начала отчета записывается в момент детектирования второго жеста управления и вычисления прямой кинематики экзоскелета. Прямая кинематика вычисляется исходя из знания структуры экзоскелета, путем перемножения однородных матриц смещения и поворота размерностью 4×4 по формуле (1):

картового положения мобильной платформы. Предложенные принципы позволяют осуществлять интуитивно понятное управление в ручном режиме движением мобильной платформы тросового робота.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Walker, Michael & Hedayati. Robot Teleoperation with Augmented Reality Virtual Surrogates / Walker, Michael & Hedayati, Hooman & Szafir, Daniel. 10.1109/HRI.2019.8673306, 2019.
2. Villani, V. Survey on human-robot collaboration in industrial settings : Safety, intuitive interfaces and applications / V. Villani, F. Pini, F. Leali and C. Secchi // Mechatronics, 03. 2018. – Vol. 55.
3. Farlinda, S. The implementation of bilateral control symmetrical position, force reflection and feedback force on the haptic manipulator / S. Farlinda, V. Permatasari and A. Fahriannur // Journal of Physics: Conference Series, 07. 2020. – Vol. 1569. – P. 032062.
4. Peña Cortés, César & Aracil, Rafael & Saltaren, Roque. Teleoperation of a Robot Using a Haptic Device with Different Kinematics / Peña Cortés, César & Aracil, Rafael & Saltaren, Roque. 10.1007/978-3-540-69057-3_22, 2008. – Pp. 181–186.
5. Marchuk, E. A. On smooth planar curvilinear motion of cable-driven parallel robot end-effector / E. A. Marchuk, Y. V. Kalinin and A. V. Maloletov // IFAC-Papers OnLine 10th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management and Control MIM 2022, 2022. – Vol. 55. – No. 10. – Pp. 2475–2480.
6. Пат. № 2753324 С1 Российская Федерация, МПК E04B 1/16, B33Y 30/00. Строительный 3D-принтер / М. М. Галимов, А. С. Клинич, А. В. Малолетов [и др.]. – № 2020140696 ; заявл. 10.12.2020 ; опубл. 13.08.2021.
7. Марчук, Е. А. Компенсация отклонений мобильной платформы параллельного тросового робота по силам натяжения тросов / Е. А. Марчук, Я. В. Калинин, А. В. Малолетов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2022. – Т. 23, № 10. – С. 515–522.

УДК 531.8

DOI 10.35211/1990-5297-2023-4-275-40-45

*И. Л. Ермолов^{1,2}, М. М. Князьков¹, Е. А. Семенов¹, А. Н. Суханов¹***ИССЛЕДОВАНИЯ НАДЕЖНОСТИ СЦЕПЛЕНИЯ
ПНЕВМАТИЧЕСКОГО РОБОТА ВЕРТИКАЛЬНОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ
С ВАКУУМНЫМИ ЗАХВАТНЫМИ УСТРОЙСТВАМИ НА КОРПУСЕ СУДНА***¹ **Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского
Российской академии наук**² **Санкт-Петербургский государственный морской технический университет**
ermolov@ipmnet.ru

В статье исследуются проблемы, возникающие во время использования робототехнических комплексов на основе пневматических роботов вертикального перемещения, оснащенных вакуумными захватными устройствами, для технического обслуживания корпусов судов. Применение роботов вертикального перемещения во многом должно помочь автоматизировать и ускорить процесс очистки и технической диагностики корпусов судов, однако в связи с тем, что поверхность перемещения робота может иметь дефекты, возникают вопросы надежности сцепления робота с корпусом судна. Смоделированы ситуации, когда робот перемещается по первично очищенной поверхности корпуса судна, как в воздушной, так и в водной среде с неизвестными дефектами поверхности перемещения. В данной статье будут исследованы процессы формирования вакуума в захватных устройствах в ситуациях, когда такое устройство, входящее в состав робототехнического комплекса, попадает на очищенную поверхность с дефектами. Проводятся натурные испытания на разработанном стенде. Исследуется уровень вакуума при вариации параметров дефектов, моделируемых с помощью калиброванных отверстий пневмодросселей.

Ключевые слова: мобильный робототехнический комплекс, биозагрязнения, корпус судна, технологическое оборудование, вакуумные захватные устройства.

*I. L. Ermolov^{1,2}, M. M. Knyazkov¹, E. A. Semenov¹, A. N. Sukhanov¹***STUDIES OF THE RELIABILITY OF COUPLING OF A PNEUMATIC WALL CLIMBING
ROBOT WITH VACUUM GRIPPING DEVICES ON THE HULL OF THE VESSEL**¹ **Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics
of the Russian Academy of Sciences**² **St. Petersburg State Marine Technical University**

The paper studies problems occurring during the use of robotic complexes based on pneumatic wall climbing robots equipped with vacuum gripping devices for the maintenance of ship hulls. The use of climbing robots in many ways should help to automate and speed up the process of cleaning and technical diagnostics of ship hulls. However, due to the fact that the surface of the robot movement may have defects, problems occur with reliability of the robot's coupling with the hull of the ship. Here situations are simulated when the robot moves along the primary cleaned surface of the ship's hull, both in the air and underwater environment, with unknown defects of the surface. In this article, the processes of vacuum formation in gripping devices are investigated in situations when such a device, which is part of a robotic complex, appears on a cleaned surface with defects. Full-scale simulations are carried out on the designed experimental stand. The vacuum level is studied with variations in the parameters of defects modeled using calibrated holes of pneumatic throttles.

Keywords: mobile robotic complex, bio-pollution, vessel hull, technological equipment, vacuum gripping devices.

Введение

Для обеспечения надежных условий эксплуатации морской и речной техники требуются специализированные робототехнические средства, которые могут проводить ее диагностику, ремонт и обслуживание. Робототехнические комплексы вертикального перемещения, использующие для фиксации на поверхности

вакуумные захватные устройства, могут надежно закрепляться на внешней поверхности корпусов судов и, в зависимости от оснащения, проводить регламентные работы по диагностике состояния поверхности корпуса, его очистке и своевременному ремонту, как в воздушной, так и в водной средах (рис. 1). Интеграция подобных комплексов в судоремонтную и судо-

© Ермолов И. Л., Князьков М. М., Семенов Е. А., Суханов А. Н., 2023.

* Работа выполнена при поддержке программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030»; НИР «Разработка облика перспективного робота для очистки корпусов судов от обрастаний» (договор № 482634 от 31.08.2022 г.), а также по теме государственного задания (№ госрегистрации 123021700055-6).

строительную отрасль позволит оснастить их современным диагностическим инструментом, который использует автоматизированные механизмы получения измерений и может предоставить комплексную информацию о струк-

турном состоянии элементов корпуса судна, дефектах, остаточной толщине, прочностных характеристиках, передавать фото- и видеоматериалы исследуемой поверхности, проводить при необходимости ее очистку и ремонт [1].

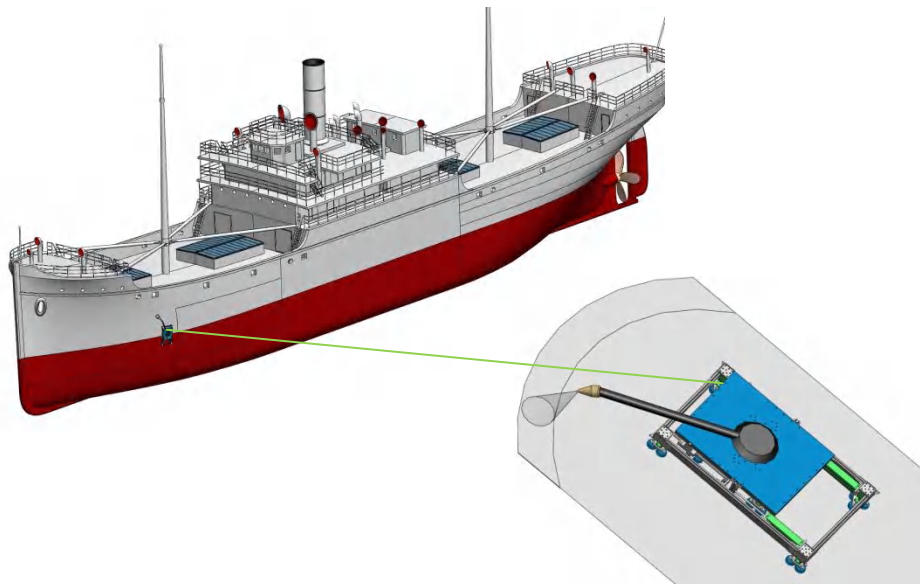


Рис. 1. Робототехнический комплекс вертикального перемещения, выполняющий операции по очистке корпуса судна

Применение робототехнических комплексов вертикального перемещения для проведения регламентных работ позволит отказаться от необходимости помещения судна в сухой док. Однако робототехнические комплексы вертикального перемещения с вакуумными захватными устройствами весьма требовательны к

качеству поверхности, по которой происходит их движение. А в ситуациях, когда судно не может быть перемещено в сухой док, для движения робототехнического комплекса по рабочей поверхности необходимо провести предварительные работы по очистке корпуса судна от обрастаний (рис. 2).

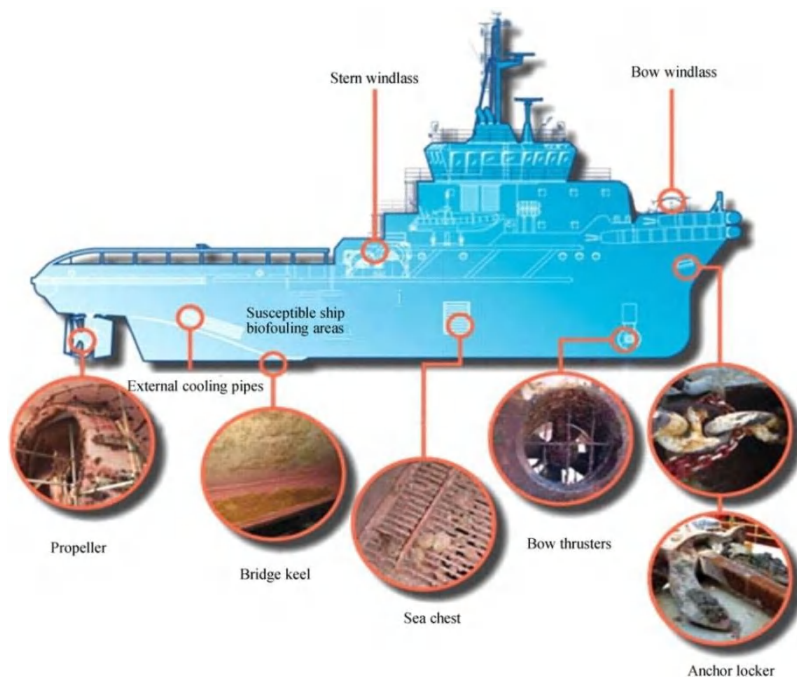


Рис. 2. Различные типы биообрастаний на корпусе судна [2]

После очистки корпуса судна вероятны выявления дефектов поверхности, которые могут существенно повлиять на надежность работы вакуумных захватных устройств удержания комплекса на поверхности судна [3]. Для этого необходимо выявить критические параметры возможных дефектов и выбрать режимы управления устройствами генерации вакуума захватных устройств для надежного закрепления робототехнического комплекса на поверхности корпуса судна.

В Институте проблем механики РАН им. А. Ю. Ишлинского (ИПМех РАН) разработан многофункциональный инспекционный робот вертикального перемещения с измерительной технологической платформой, спроектированной по принципу модульной системы. На базе транспортного модуля робота вертикального перемещения, использующего для закрепления на поверхности вакуумные захватные устройства эжекторного типа, формируются модули технологической оснастки, в состав которых входят измерительное и инспекционное оборудование и подсистемы управления движением и измерениями (рис. 3). Данный робототехнический комплекс использует пневматические приводы для перемещения и подъема опускания захватных устройств (длина шага – 0,4 м, а скорость перемещения робота – 1,5 м/мин). Управление осуществляется в супервизорном режиме и позволяет роботу выполнять технические операции в полуавтоматическом режиме, пока не возникнет внештатная ситуация или не потребуются вмешательство оператора [4].

Данный многофункциональный инспекционный робот может быть использован как один



Рис. 3. Внешний вид многофункционального инспекционного робота

из основных компонентов комплексной системы диагностики, суть которой заключается в комплексном подходе к инспектированию и освидетельствованию судов морского и речного базирования. На разработанном в ИПМех РАН робототехническом комплексе были установлены датчики толщиномера и структуроскопа, позволяющие измерять остаточную толщину металла и проводить диагностику качества сварных швов корпусов судов.

Данная тематика актуальна и за рубежом. В Евросоюзе в рамках выполнения международного проекта шестой европейской рамочной программы был разработан прототип автономного робота для очистки корпусов судов HISMAR (Hull Identification System for Marine Autonomous Robotics) [5] (рис. 4); в состав участников от РФ входили представители лабораторий робототехники и мехатроники ИПМех РАН и МГТУ СТАНКИН. Целью проекта HISMAR являлось повышение автономности мобильных роботов для очистки корпусов судов от биологического обрастания.



Рис. 4. Прототип автономного робота для очистки корпусов судов HISMAR

Общая структура мобильного робототехнического комплекса включает следующие основные компоненты: систему очистки; систему крепления к корпусу судна; транспортный модуль – несущую раму – и приводные модули; сенсорную систему; систему управления; энергетическую систему.

Экспериментальные исследования по выявлению критериев надежности сцепления робота с поверхностью

Перед началом движения робототехнического комплекса по корпусу судна необходима предварительная очистка поверхности, по которой робот будет перемещаться. Очистка может проводиться во время движения робото-

технического комплекса с помощью технологического оборудования (модуля) [6], расположенного на борту робота (рис. 5). Одним из способов очистки корпуса судна может стать устройство гидроструйной очистки высокого давления. Принцип действия модуля очистки

заключается в воздействии на поверхность судна на вращающейся точечной струей воды, которая формируется роторной водяной фрезой высокого давления. Таким образом, можно эффективно очищать поверхность судна, не повреждая ее окрашенного слоя.

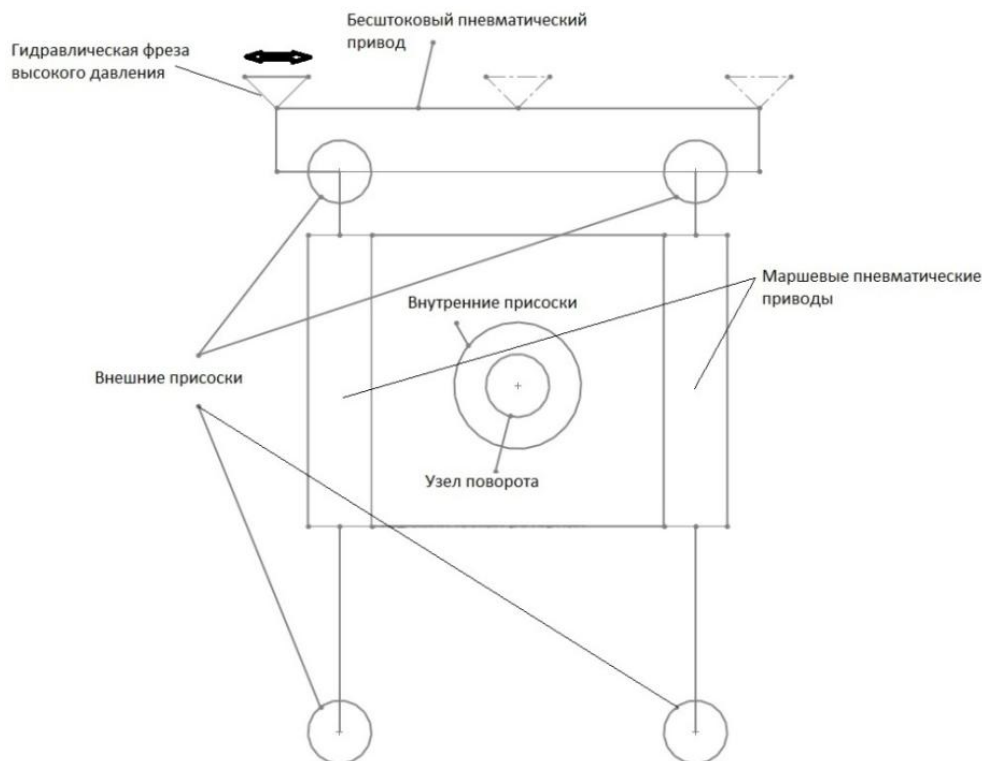


Рис. 5. Принципиальная схема модуля очистки

Алгоритм процесса очистки состоит в следующем. На маршевые приводы линейного перемещения транспортного модуля подается сигнал на движение в режиме «ползучих» скоростей; при этом происходит движение бесштокового привода, закрепленного на штоках маршевых приводов. Одновременно с сигналом на движение маршевых приводов подается сигнал на движение бесштокового привода, на движущей части которого закреплена гидрав-

лическая роторная фреза высокого давления, и сигнал на подачу давления к роторной фрезе. Таким образом, происходит движение фрезы вдоль и одновременно поперек траектории движения транспортного модуля и достигается большая область очистки за один цикл движения комплекса очистки. Траектория движения гидравлической фрезы высокого давления показана на рис. 6.

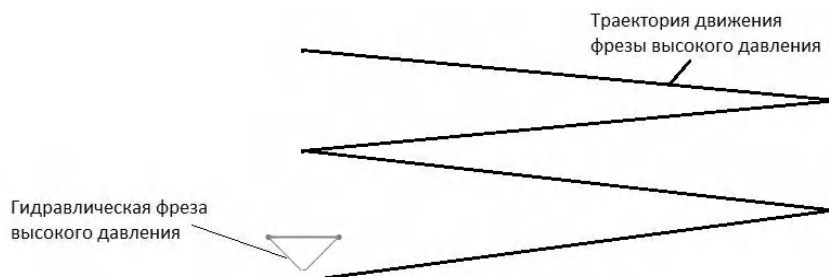


Рис. 6. Траектория движения гидравлической фрезы высокого давления

Таким образом, происходит очистка бортов судна.

Исходя из анализа различных источников, можно выделить следующие уровни давления, подающиеся на гидравлическую фрезу, при которых возможно удаление с борта судна следующих типов загрязнений и покрытий:

до 50 бар удаляются растительные обрастания корпусов судна;

от 100 до 250 бар удаляются твердые биологические обрастания (балянусы и прочие);

от 250 до 500 бар удаляется только рыхлая краска;

свыше 1000–2500 бар сбивается слабая краска.

Для снятия специальных красок нужно использовать гидropескоструйную или лазерную обработку.

Таким образом, с учетом снижения энергии струи при работе в водной среде предварительно можно выбрать уровень рабочего давления в пределах 500–1500 бар. Ввиду недостаточных сведений о процессах воздействия водяной струи высокого давления на обрастания судов, требуется дальнейшие исследования в этой области для уточнения уровней давления и других параметров.

Для выявления критериев надежности сцепления робота с очищенной поверхностью корпуса судна был разработан стенд для исследования уровня вакуума в захватном устройстве при вариации параметров дефектов, моделируемых с помощью калиброванных отверстий пневмодросселей.

Во время эксперимента использовались три типа устройства генерации вакуума эжекторного типа фирмы Festo: VAD-1/8; VN-10-h; VAN-14-I.

На графиках (рис. 7–9) изображена зависимость уровня вакуума, создаваемого в камере вакуумирования устройства фиксации робота на поверхности, от таких параметров, как уровень входного давления рабочего тела (воздуха) и диаметра пневмодросселя. В данном эксперименте вариативность диаметра пневмодросселя эмулировала геометрию трещины или сквозного дефекта, в области которого происходит фиксация робота к поверхности. Из этого графика видно, что у представленного генератора вакуума есть уровни входного давления, при которых фиксация на поверхности будет надежной даже при наличии сквозного дефекта или трещины.

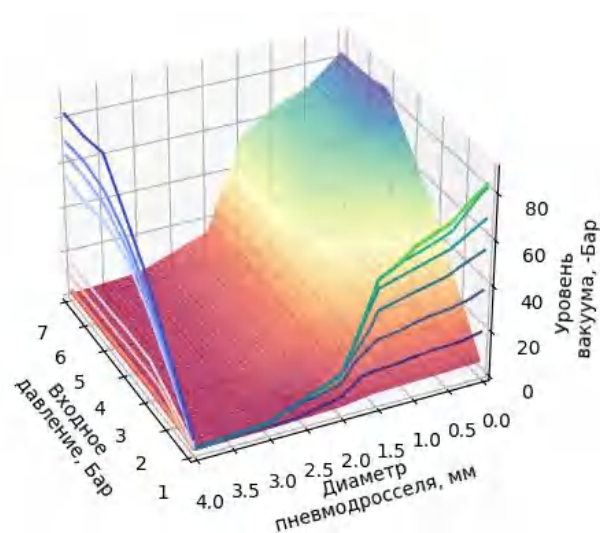


Рис. 8. График уровня вакуума для эжектора Festo VN-10-h

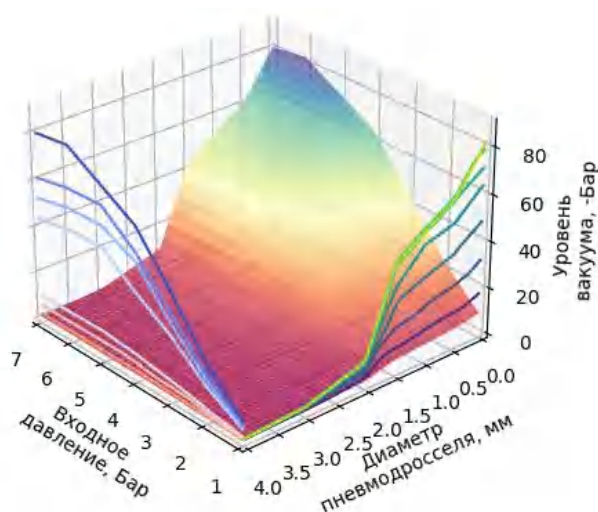


Рис. 7. График уровня вакуума для эжектора Festo VAD-1/8

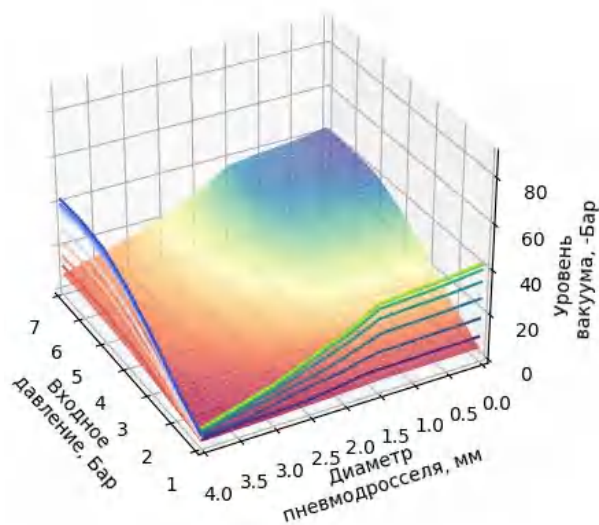


Рис. 9. График уровня вакуума для эжектора Festo VN-14-I

Однако при увеличении размеров трещины или сквозного дефекта происходит резкое снижение характеристики уровня вакуума, создаваемого в зоне фиксации. Дифференциальная оценка уровня вакуума, создаваемого в данном случае, позволит сделать вывод о надежности фиксации и вероятности срыва с поверхности, что, в свою очередь, позволит диагностировать наличие опасного участка, а алгоритму системы управления робота – сделать выбор о смене траектории движения или предупреждении на верхнем уровне принятия решения.

Выводы

В результате экспериментального моделирования удалось выявить диапазон дефектов поверхности, при котором возможно использование робота вертикального перемещения с вакуумными захватными устройствами на корпусе судна. В дальнейшей перспективе прослеживается необходимость разработки отечественного мобильного робототехнического комплекса бортового базирования, который можно было бы использовать для очистки корпусов судов, как в воздушной, так и в водной среде. Новые робототехнические комплексы смогут удалять биозагрязнения с корпуса судна, как под водой,

так и выше ватерлинии, когда судно стоит на рейде или на якоре у причала.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Cleaning By Means of the HISMAR Autonomous Robot / V. S. Balashov, B. A. Gromov, I. L. Ermolov, A. P. Roskilly // Russian Engineering Research. – 2011. – Vol. 31. – № 6. – Pp. 589–592.
2. Bixler, G. D. Biofouling: lessons from nature / G. D. Bixler, B. Bhushan // Phil. Trans. R. Soc. A: Math. Phys. Eng. Sci. – 2012 – № 370(1967). – Pp. 2381–2417.
3. Динамические процессы в вакуумных контактных устройствах роботов вертикального перемещения в водной среде / В. Г. Градецкий, М. М. Князьков, Е. А. Семенов, А. Н. Суханов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2019. – Т. 20. – № 7. – С. 417–421.
4. Управляемое движение мобильных роботов по произвольно ориентированным в пространстве поверхностям / В. Г. Градецкий, В. Б. Вешников, С. В. Калинин, Л. Н. Кравчук. – М.: Наука, 2001. – 359 с.
5. Cleaning By Means of the HISMAR Autonomous Robot / V. S. Balashov, B. A. Gromov, I. L. Ermolov, A. P. Roskilly // Russian Engineering Research. – 2011. – Vol. 31. – № 6. – Pp. 589–592.
6. Адаптация технологического оборудования для использования на мобильном робототехническом комплексе вертикального перемещения (МРК), спроектированного для работы на вертикальных и горизонтальных поверхностях нефте- и газохранилищ / И. Л. Ермолов, М. М. Князьков, Е. А. Семенов, А. Н. Суханов // Станкоинструмент. – 2022. – Т. 3. – № 028. – С. 58–64.

УДК 62-529

DOI 10.35211/1990-5297-2023-4-275-45-51

Ю. Л. Караваев

КИНЕМАТИЧЕСКИЕ СХЕМЫ И ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ДВИЖЕНИЯ СФЕРИЧЕСКИХ РОБОТОВ*

Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова

karavaev_yury@istu.ru

Работа посвящена описанию кинематических схем существующих сферических роботов, особенностей их технической реализации. Рассмотрены новые кинематические схемы мобильных роботов в форме сферы, обсуждаются их достоинства, а также подходы к описанию движения. Предложен подход для получения уравнений движения сферических роботов в форме уравнений Лагранжа второго рода в подвижной системе координат, связанной с подвижными элементами внутри сферической оболочки с учетом непроскальзывания сферы относительно подстилающей поверхности. Применение данного подхода позволяет использовать модели вязкого трения качения для описания движения сферических роботов.

Ключевые слова: сферический робот, кинематическая схема, уравнения движения.

© Караваев Ю. Л., 2023.

* Исследование осуществлено в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России (FZZN-2020-0011).

Yu. L. Karavaev

KINEMATIC MODELS AND APPROACHES TO DYNAMIC MODELING OF SPHERICAL ROBOTS

Kalashnikov Izhevsk State Technical University

The article is devoted to the description of the kinematic models of existing spherical robots, the features of their technical implementation. New kinematic models of mobile robots in the form of a sphere are considered, their advantages are discussed, as well as approaches to the description of motion. An approach is proposed for obtaining the equations of motion of spherical robots in the form of Lagrange equations of the second kind in a moving coordinate system associated with moving elements inside a spherical shell, taking into account the non-slip of the sphere relative to the underlying surface. The use of this approach makes it possible to use fairly simple models of viscous rolling friction.

Keywords: spherical robot, kinematic model, equations of motion.

Введение

В последнее время активное развитие получают направления, связанные с разработкой и внедрением в различные сферы мобильных роботов. Исследователями и инженерами проводятся работы по созданию новых конструкций мобильных роботов, обеспечивающих новые функциональные возможности. К числу подобных мобильных роботов относятся сферические роботы, ключевыми особенностями которых является форма, обеспечивающая маневренность, а также конструкция, которая подразумевает расположение всех механических и электронных компонентов внутри герметичной сферической оболочки, защищая их от агрессивных условий внешней среды. Наиболее подробные обзоры существующих прототипов сферических роботов, особенностей их конструкций и описание сфер применения можно найти в работах [1, 2, 3]. Сферические роботы разрабатываются для задач мониторинга и исследования, в том числе в условиях других планет, в качестве сервисных роботов и роботов для развлечений. Особое место занимают роботы, которые используются в образовательных целях, как пример динамической системы, для которой необходимо разработать алгоритм управления и стабилизации.

Сферические роботы – относительно новый вид мобильных роботов, появившийся чуть более 30 лет назад, но, несмотря на это, сегодня существует несколько десятков различных конструкций и кинематических схем приведения

их в движение. Рассмотрим основные наиболее распространенные механизмы с точки зрения обеспечения маневренности сферороботов и критерия эффективности движущих масс, который определяется как соотношение массы неподвижных относительно сферической оболочки элементов к массе подвижных, участвующих в создании движущей силы.

Кинематические схемы сферических роботов

Выделяют три базовых механизма приведения в движение сферических роботов: с помощью изменения положения центра масс, за счет изменения внутреннего кинетического момента и движение за счет деформации сферической оболочки. Каждый из данных принципов приведения в движение имеет свои достоинства и недостатки, поэтому наиболее активно в последнее время разрабатываются конструкции, комбинирующие данные способы передвижения.

Наиболее распространенным способом приведения в движение является изменение положения центра масс сферического робота. Данный принцип реализуется различными механизмами: внутренними колесными платформами, маятниковыми механизмами, линейными направляющими, перемещающими массы внутри сферической оболочки. На рис. 1 представлены кинематические схемы сферических роботов, приводимых в движение внутренними колесными платформами.

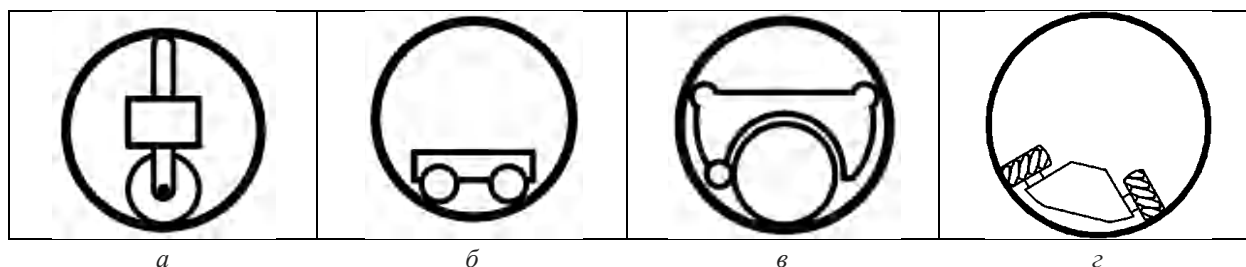


Рис. 1. Кинематические схемы сферических роботов, приводимых в движение внутренними колесными платформами: *a* – одноколесная платформа; *б* – дифференциальный привод; *в* – платформа со сферическим колесом; *г* – платформа с роликонесущими колесами

Одноколесная платформа являлась приводным механизмом первого сфероробота, созданного командой А. Хальме [4]. В данной схеме для поворотов на платформе используется дополнительный привод, поворачивающий либо колесо, либо платформу относительно сферической оболочки [5]. Недостатком этой кинематической схемы является необходимость обеспечения дополнительного контакта в диаметрально противоположной к колесу стороне сферической оболочки для обеспечения устойчивости платформы, а также балансировка платформы. Колесные платформы с дифференциальным приводом не требуют наличия дополнительной опоры, а управление для данной кинематической схемы упрощается и может быть развито из моделей управления обычными колесными роботами [6].

Наиболее маневренными среди всех кинематических схем являются модели с подвижными платформами на сферическом колесе, либо с роликонесущими колесами. В первом случае движение платформы осуществляется за счет вращения через специальные ролики сферического колеса [7]. Недостатком данной модели является сложность обеспечения постоянного контакта между роликами и сферическим колесом, а так-

же между ним и внутренней поверхностью сферической оболочки. Кинематические схемы сферороботов с внутренними подвижными платформами на базе роликонесущих колес являются конструктивно более сложными, но позволяют обеспечить максимальную маневренность (возможность движения в любом направлении), при этом управление ими не является интуитивно понятным и требует понимания кинематики и динамики движения [8, 9].

Главным недостатком всех конструкций сферических роботов с внутренними подвижными платформами является необходимость обеспечения гладкой внутренней поверхности сферической оболочки и необходимость обеспечения с ней постоянного контакта колес. Однако данные схемы имеют самую высокую эффективность движущих масс, так как вся масса подвижной платформы приводит в движение сферический робот.

Не менее популярными кинематическими схемами являются маятниковые механизмы, к ним относятся маятники с двумя и тремя степенями подвижности [3, 10]; комбинации из нескольких маятников с одной степенью подвижности [11], а также механизмы на основе карданного подвеса [12] (см. рис. 2).

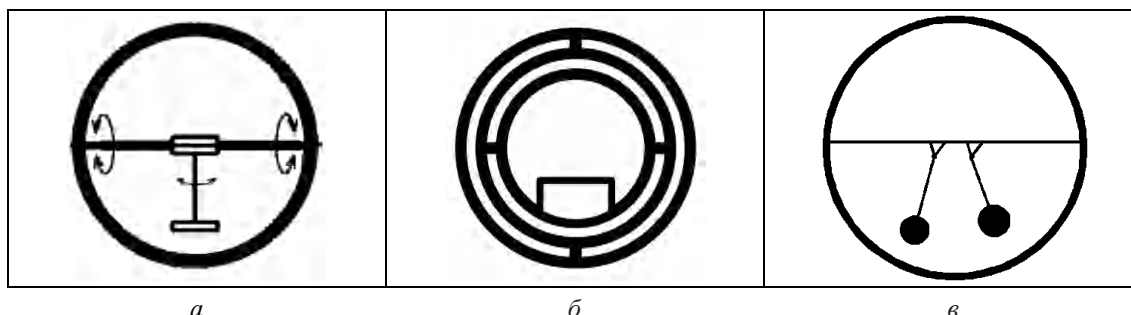


Рис. 2. Кинематические схемы сферических роботов с маятниковыми механизмами:

a – маятниковые механизмы с двумя и тремя степенями подвижности; *b* – механизмы на основе карданного подвеса; *v* – несколько маятников с одной степенью подвижности

Маятниковые механизмы с одной и двумя степенями подвижности являются достаточно простыми, но не позволяют обеспечить маневренность сферического робота (в частности, мгновенное изменение направления движения). Более сложные конструкции маятниковых механизмов, имеющих три степени подвижности, требуют использования высокомоментных приводов и безлюфтовых передач, при этом компактных и имеющих небольшую массу, что препятствует их широкому распространению.

Кроме рассмотренных механизмов для изменения положения центра масс системы ис-

пользуются комбинации линейных направляющих. Общая кинематическая схема для данных механизмов может быть представлена в виде схем, приведенных на рис. 3. Существующие модели сферических роботов, реализующие данный принцип передвижения, отличаются количеством и расположением направляющих. В одном случае каждая из направляющих перемещает отдельный груз [13], а в случае механизма параллельной кинематики несколько направляющих определяют положение одной массы [14]. Достоинством данных механизмов является то, что с их помощью

можно реализовать высокую маневренность сферического робота, однако критерий эффективности движущей массы является невысоким, так как сами направляющие обладают значительной массой.

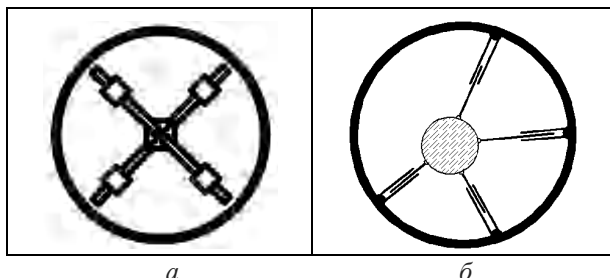


Рис. 3. Кинематические схемы сферических роботов с изменением положения центра масс с помощью линейных направляющих:
a – линейные направляющие; *б* – механизмы параллельной кинематики

Следующий вид сферических роботов реализует принцип приведения в движение за счет изменения внутреннего кинетического момента, который создается системой роторов. Кинематические схемы данных механизмов приведены на рис. 4. Можно выделить две схемы: в первом случае внутри сферы располагаются два соосных ротора, а движение сферы происходит в направлении, перпендикулярном вектору угловой скорости, либо, при вращении роторов в разном направлении, но с одинаковой по модулю угловой скоростью, происходит поворот сферы на месте. Вторая схема реализуется несколькими роторами (известны конструкции с тремя [16, 17] и четырьмя [15] роторами). В этом случае равнодействующий кинетический момент определяет направление движения сферической оболочки, центр масс при этом должен располагаться в геометрическом центре сферической оболочки. Основным недостатком данных схем является ограниченность момента приводов роторов и их углового ускорения, так как именно они обеспечивают движение сферической оболочки, а вследствие действия диссипативных сил при постоянном вращении роторов движение сферической оболочки прекращается. Тем не менее данный способ передвижения получил распространение в комбинации с другими, а также используется для стабилизации движения сферических роботов [18].

В отдельную группу выделяются сферические роботы, которые перемещаются за счет деформации (изменения формы) сферической оболочки [19, 20] (см. рис. 5). В этом случае обо-

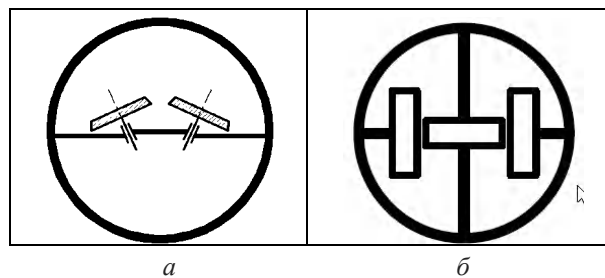


Рис. 4. Кинематические схемы сферических роботов, перемещающихся за счет изменения внутреннего кинетического момента:
a – несколько роторов с непараллельными осями вращения;
б – два соосных ротора

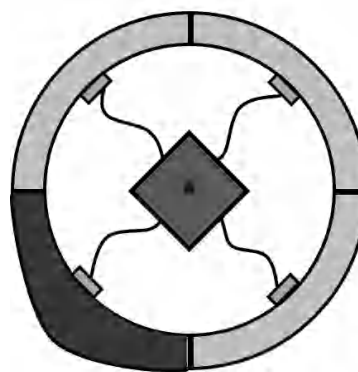


Рис. 5. Кинематическая схема сфероробота с деформируемой оболочкой

лочка изготавливается гибкой либо состоит из отдельных сегментов, каждый из которых с помощью системы приводов может изменять свое положение относительно соседних (как во внутреннюю, так и внешнюю сторону). Конструкции данного вида сферических роботов, как правило, передвигаются с невысокой скоростью, имеют низкую эффективность движущей массы, однако способны преодолевать препятствия на пути движения.

Кроме рассмотренных базовых кинематических схем активно развиваются механизмы, комбинирующие различные принципы приведения в движение (см. рис. 6). Наиболее перспективной и простой является кинематическая схема маятникового механизма с установленным на нем ротором [21, 22] (или системой роторов), также объединяющей два принципа приведения в движение: изменение положения центра масс и изменение внутреннего кинетического момента; реализуется кинематической схемой, когда ротор располагается на колесной платформе. Вращение ротора используется для поворотов сферической оболочки, поэтому для передачи кинетического момента на сферическую оболочку колесная платформа передвига-

ется по специальному ободу [23]. Достоинствами данных схем являются достаточно простые конструкции комбинированных сферороботов, высокая эффективность использования движущих масс, а также более простые и эффективные механизмы стабилизации движения. Кроме этого, подобные конструкции позволяют сократить количество приводных двигателей (управлений), т. е. для реализации трех степеней подвижности системы используются только два управляющих воздействия, что в свою очередь требует изучения и описания динамики движения сферороботов, использующих подобные кинематические схемы.

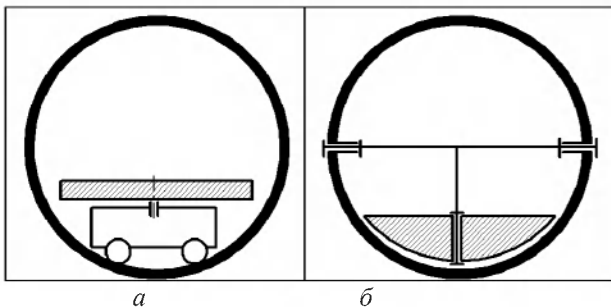


Рис. 6. Кинематические схемы сферических роботов с приводными механизмами комбинированного типа: *а* – колесная платформа с ротором; *б* – маятниковый механизм с одной степенью подвижности и ротором

Разнообразие кинематических схем сферических роботов позволяет выбрать или модифицировать существующие под условия конкретных задач, что имеет ключевое значение при разработке конструкции сферических роботов и алгоритмов управления ими.

Моделирование движения сферических роботов

Большинство работ, в области исследования движения сферических роботов, помимо описания конструкций подразумевает описание только их кинематики. По мнению авторов данных работ, этого достаточно для формирования управления, планирования траектории и построения регуляторов, обеспечивающих движение вдоль требуемой траектории. Однако немногочисленные экспериментальные результаты демонстрируют существенное отклонение траектории движения от заданной, и часто погрешность позиционирования может достигать 50 % [9, 24]. Это объясняется сложностью динамической системы и требует проведения анализа динамики системы. Поэтому некоторыми исследователями делаются попытки описать динамику движения сферических роботов и ис-

пользовать ее для формирования алгоритмов управления.

Наиболее распространенным подходом для описания динамики движения сферических роботов является использование закона сохранения кинетического момента либо уравнений Лагранжа второго рода:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = \tau_i,$$

где L – функция Лагранжа для рассматриваемой системы; \dot{q}_i, q_i – обобщенная скорость и координата, задающая положение системы; τ_i – обобщенная сила, действующая на систему.

Следует отметить, что выбор формы уравнений движения напрямую зависит от сложности конструкции (кинематической схемы) сфероробота. Так, для маятниковых механизмов с одной или двумя степенями подвижности авторы записывают уравнения движения в форме уравнений Лагранжа второго рода в неподвижной системе координат, но, когда система предполагает комбинацию нескольких механизмов, задача записи уравнений движения в неподвижной систем координат существенно усложняется. Наиболее универсальной в данном случае является запись уравнений движения в подвижной системе координат в форме уравнений Лагранжа с неопределенными множителями, соответствующими реакциям неинтегрируемых связей, наложенных на систему [25]:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \vec{\omega}} \right) + \vec{\omega} \times \frac{\partial L}{\partial \vec{\omega}} + \vec{v} \times \frac{\partial L}{\partial \vec{v}} + \vec{\gamma} \times \frac{\partial L}{\partial \vec{\gamma}} = \lambda \frac{\partial f}{\partial \vec{\omega}} + \vec{M},$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \vec{v}} \right) + \vec{\omega} \times \frac{\partial L}{\partial \vec{v}} = \lambda \frac{\partial f}{\partial \vec{v}} + \vec{F},$$

где $\vec{\omega}, \vec{v}$ – векторы угловой и линейной скоростей, записанные в подвижной системе координат; $\vec{\gamma}$ – вектор вертикали в проекции на оси подвижной системы координат; λ – неопределенный множитель Лагранжа,

$$f = \vec{v} + \vec{\omega} \times \vec{r} = 0 \tag{1}$$

– неголономная связь, обеспечивающая отсутствие проскальзывания сферической оболочки; \vec{r} – радиус-вектор, определяющий положение точки контакта в подвижной системе координат. Векторы \vec{F} и \vec{M} – это обобщенная сила и момент внешних сил (например, сила трения и момент сопротивления движению).

Не менее важным при описании движения сферических роботов является вопрос моделирования сил трения (сопротивления движе-

нию). Часто трение в работах по исследованию динамики сферических роботов просто исключают из рассмотрения. В работах [10, 13] учитываются только статические силы или момент трения покоя. В работе [17] для моделирования движения сфероробота с внутренними роторами используется двухкомпонентная модель трения, предложенная А. В. Карапетяном [27], однако дальнейшего развития данный подход не получил и экспериментальные исследования проведены не были.

Более простая модель вязкого трения качения, включая особенности ее применения при описании качения сферических тел и методика определения коэффициентов, описана в работе [28]. Предлагается момент сопротивления качению, который можно представить в виде

$$\vec{M} = \mu \vec{\omega}, \quad (2)$$

где μ – коэффициент вязкого трения качения, который восстанавливается из экспериментальных данных для каждой пары материалов подстилающей поверхности и сферической оболочки. Важной особенностью данной модели трения является то, что при добавлении момента в виде (2) неголономная связь (1) не нарушается, что позволяет использовать рассматриваемые уравнения движения. Результаты экспериментальных исследований задач с качением различных тел [28], а также применение модели для описания движения сферического робота [22] позволяют сделать вывод об ее адекватности и возможности ее использования при построении управления сферическими роботами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Karavaev, Y. L. Spherical Robots: An Up-to-Date Overview of Designs and Features // Russian Journal of Nonlinear Dynamics. – 2022. – Vol. 18. – No. 4. – Pp. 699–740.
2. Bujnak, M. et al. Spherical Robots for Special Purposes: A Review on Current Possibilities // Sensors. – 2022. – Vol. 22. – No. 4. – Art. 1413. – 36 pp.
3. Ylikorpi, T. Mobility and Motion Modelling of Pendulum-Driven Ball Decoupled Models Robots: For Steering and Obstacle Crossing // Doctoral Dissertations. – 2017. Helsinki, Helsinki Univ. of Technology. – 251 pp.
4. Halme, A. et al. Motion control of a spherical mobile robot // In Advanced Motion Control, AMC'96-MIE. Proc. 4th Int. Workshop on. – 1996. – Vol. 1. – Pp. 259–264.
5. Budanov, V. M. et al. Prevention of Oscillations of a Spherical Robot in Longitudinal Motion // J. Comput. Syst. Sci. Int. – 2022. – Vol. 61. – Pp. 567–580.
6. Akella, P. Controlling the Locomotion of Spherical Robots or Why BB-8 Works / P. Akella, O. O'Reilly, K. Sreenath // ASME Journal of Mechanisms and Robotics. – 2019. – Vol. 11. – No. 2. – Pp. 024501-024501-4.
7. Chen, W. et al. Design and implementation of a ball-driven omnidirectional spherical robot // Mechanism and Machine Theory. – 2013. – Vol. 68. – Pp. 35–48.
8. Karavaev, Yu. L. Nonholonomic Dynamics and Control of a Spherical Robot with an Internal Omniwheel Platform: Theory and Experiments / Yu. L. Karavaev, A. A. Kili // Proceedings of the Steklov Institute of Mathematics. – 2016. – Vol. 295. – Pp. 158–167.
9. Chen, W. et al. Design and Implementation of an Omnidirectional Spherical Robot Omnicron // The 2012 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. – July 11–14. – 2012. – Kaohsiung, Taiwan. – Pp. 719–724.
10. Belzile, B. ARIES: Cylindrical Pendulum Actuated Explorer Sphere / B. Belzile, D. St-Onge // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. – 2022. – Vol. 27. – No. 4. – Pp. 2142–2150.
11. DeJong, B. P. et al. Design and Analysis of a Four-Pendulum Omnidirectional Spherical Robot // J Intell Robot Syst. – 2017. – Vol. 86. – Pp. 3–15.
12. Tsai, C. et al. Gimbal Structure for the Design of 3D Flywheel System // International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering. – 2015. – Vol. 9. – No. 6. – Pp. 1125–1130.
13. Su, B. Motion control for a novel rolling robot with three sliders / B. Su, T. Wang // American Control Conference. – 2012. – Pp. 4855–4860.
14. Prakupovich, R. A. Mobile robot with zero-turn // Robotics and Technical Cybernetics. – 2015. – No. 2(7). – Pp. 39–44 (in Russian).
15. Borisov, A. V. et al. How To Control the Chaplygin Ball Using Rotors: 2 // Regular and Chaotic Dynamics. – 2013. – Vol. 18. – Nos. 1–2. – Pp. 144–158.
16. V. Joshi, R. et al. Design and analysis of a spherical mobile robot // Mechanism and Machine Theory. – 2010. – Vol. 45. – Iss. 2. – Pp. 130–136.
17. Terehov, G. P. Control of the unbalanced spherical robot / G. P. Terehov, V. E. Pavlovsky // KIAM Preprints. – 2017. – No. 90. – Pp. 1–23 (in Russian).
18. Hu, Y. et al. Design and Performance Evaluation of a Spherical Robot Assisted by High-Speed Rotating Flywheels for Self-Stabilization and Obstacle Surmounting // Journal of Mechanisms and Robotics. – 2021. – No. 13. – Pp. 1–17.
19. Sugiyama, Y. Crawling and jumping by a deformable robot / Y. Sugiyama, S. Hirai // Int. J. Robot. Res. – 2006. – Vol. 25. – Pp. 603–620.
20. Wait, K.W. et al. Self locomotion of a spherical rolling robot using a novel deformable pneumatic method // 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation. – Pp. 3757–3762.
21. Kilin, A. A. Spherical Robot of Combined Type: Dynamics and Control / A. A. Kilin, E. N. Pivovarova, T. B. Ivanova // Regular and Chaotic Dynamics. – 2015. – Vol. 20. – No. 6. – Pp. 716–728.
22. Ivanova, T. B. et al. Control of a Pendulum-Actuated Spherical Robot on a Horizontal Plane with Rolling Resistance // Archive of Applied Mechanics. – 2022. – Vol. 92. – No. 1. – Pp. 137–150.
23. Borisov, A. V. et al. Stabilization of the Motion of a Spherical Robot Using Feedbacks // Applied Mathematical Modelling. – 2019. – Vol. 69. – Pp. 583–592.
24. Килин, А. А. Кинематическая модель управления высокоманевренным мобильным сферороботом с внутренней омниколесной платформой / А. А. Килин, Ю. Л. Караваев, А. В. Клековкин // Нелинейная динамика. – 2014. – Т. 10. – № 1. – С. 113–126.
25. Борисов, А. В. Динамика твердого тела. Гамильтоновы методы, интегрируемость, хаос / А. В. Борисов, И. С. Мамаев // Москва – Ижевск : Институт компьютерных исследований, 2005. – 576 с.

26. *Zhao, B. et al.* Dynamics and Motion Control of a Two Pendulums Driven Spherical Robot // Proc. of the 2010 IEEE/RSJ Internat. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS). – 2010. – Taipei, Taiwan. – Pp. 147–153.

27. *Карапетян, А. В.* Двухпараметрическая модель

трения / А. В. Карапетян // ПММ. – 2009. – Т. 73. – Вып. 4. – С. 515–519.

28. *Караваев, Ю. Л.* Динамическая модель трения качения сферических тел по плоскости без проскальзывания / Ю. Л. Караваев, А. А. Килин, А. В. Клековкин // Нелинейная динамика. – 2017. – Т. 13. – № 4. – С. 599–609.

УДК 004.896+007.3+007.52+51-74+517.97+62-52+681.5
DOI 10.35211/1990-5297-2023-4-275-51-57

А. М. Кошман, А. С. Быков, А. В. Леонард, В. А. Шурыгин
**ПЛАНИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ НАЗЕМНОГО РОБОТА
С УЧЕТОМ ЕГО 2D-ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОРИЕНТАЦИИ
И ОБХОДОМ ОДНОГО СТАТИЧНОГО ПРЕПЯТСТВИЯ**

Волгоградский государственный технический университет

artkoshman@gmail.com, alexanderbs00@mail.ru, alex-leonard@yandex.ru, au@vstu.ru

В статье рассматривается подход планирования движения мобильного робота, основанный на методе $VC/APF+BC_{\tau}^1$ [4]. Предлагаемый подход позволяет обеспечить синтез законов движения робота для обхода статического препятствия и учитывать требуемое изменение ориентации робота в 2D-пространстве.

Ключевые слова: мобильный робот, планирование движения, вариационное исчисление, метод потенциальных полей, оптимальное управление, компьютерное моделирование.

A. M. Koshman, A. S. Bykov, A. V. Leonard, V. A. Shurygin

**MOTION PLANNING OF A GROUND ROBOT TAKING INTO ACCOUNT
ITS 2D-SPACE ORIENTATION AND BYPASSING ONE STATIC OBSTACLE**

Volgograd State Technical University

The article discusses the motion planning approach for a mobile robot based on the $VC/APF+BC_{\tau}^1$ method. The proposed approach makes it possible to synthesize the laws of motion of a robot to bypass a static obstacle and take into account the required change in the orientation of the robot in 2D-space.

Keywords: mobile robot, motion planning, calculus of variations, potential field method, optimal control, computer simulation.

Введение

При планировании движения мобильных роботов применяются различные методы локального и глобального планирования движения [1, 2]. Наиболее эффективными являются реактивные методы и методы потенциальных полей [3]. Данные группы методов применимы для автоматического управления роботом в условиях реального времени, позволяют планировать гладкие (реализуемые) траектории движения робота, подходят для планирования движения в недетерминированной среде. Однако реактивные методы обладают недостаточной математической строгостью, а классическая формализация опубликованных методов потенциальных полей, в известных работах, не учитывает ориентацию робота в пространстве и возможность задать конечную скорость (центра масс робота) отличной от нуля. При применении мобильных роботов в реальных условиях

значение скорости в конце пути может быть как равным нулю, так и отличаться от нуля. Выполнение оперативных задач роботом также требует учета изменения его ориентации в пространстве за отведенное время. Наиболее близким к предлагаемому подходу является метод $VC/APF+BC_{\tau}^1$, описанный в статьях [4, 5]. Данный метод (основанный на совместном применении вариационного исчисления и силовых полей с заданными граничными условиями) позволяет задавать конечную скорость робота, отличную от нуля, но без учета ориентации робота в пространстве. В связи с этим ставится и решается следующая модельная задача.

1. Постановка задачи

Необходимо синтезировать законы изменения ориентации робота в 2D-пространстве совместно с законами перемещения центра масс робота при обходе статического препятствия. Движение мобильного робота происходит из на-

начальной точки O в конечную точку F , в которую необходимо попасть за отведенное время τ с начальными и конечными условиями: $x_0, y_0, \varphi_0, \dot{x}_0, \dot{y}_0, \dot{\varphi}_0$ и $x_\tau, y_\tau, \varphi_\tau, \dot{x}_\tau, \dot{y}_\tau, \dot{\varphi}_\tau$ (рис. 1). При этом полагается, что робот способен реализовывать любую траекторию движения собственного центра масс и осуществлять пово-

рот вокруг него как угодно быстро (обладает идеальной маневренностью). Сканирующее устройство технического (компьютерного) зрения получает и обрабатывает информацию о препятствиях мгновенно и в полном объеме (на заданном удалении), а угол сканирования составляет 2π .

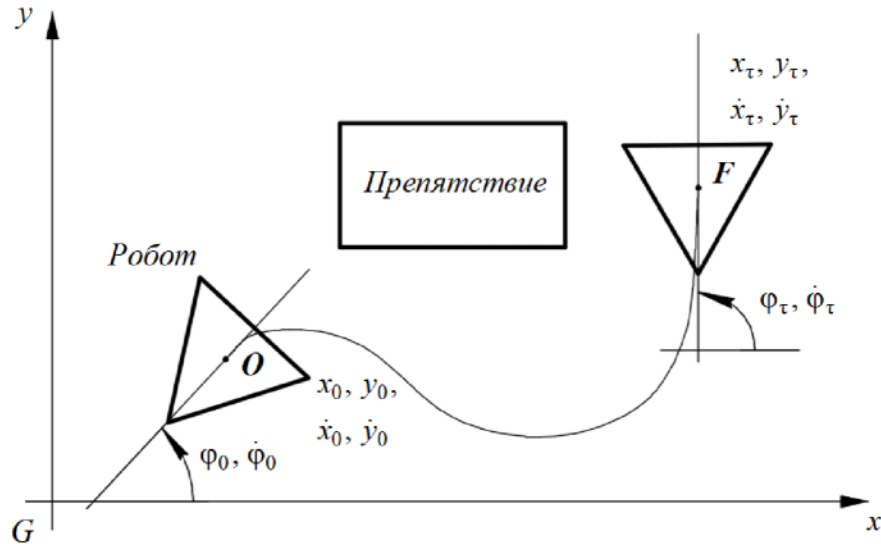


Рис. 1. Постановка задачи

2. Решение

Аналогично, как и в статье [4], движение мобильного робота на плоскости разделяется на три режима: 1 – движение робота при видимом отсутствии препятствия; 2 – движение с обходом видимого препятствия; 3 – движения с препятствием «позади» робота.

Режим «1». При свободном движении ро-

бота, для выполнения граничных условий: $x_0, y_0, \varphi_0, \dot{x}_0, \dot{y}_0, \dot{\varphi}_0; x_\tau, y_\tau, \varphi_\tau, \dot{x}_\tau, \dot{y}_\tau, \dot{\varphi}_\tau$, математические зависимости, описывающие законы движения робота, должны содержать минимум двенадцать констант. Для поиска законов движения вводится критерий с учетом ориентации робота в пространстве (аналогично критерию 4 статьи [4]):

$$I = \int_0^\tau \Phi(t, x, y, \varphi, \dot{x}, \dot{y}, \dot{\varphi}, \ddot{x}, \ddot{y}, \ddot{\varphi}) dt, \quad \Phi = T + T_a + T^* + T_\varepsilon^*, \quad (1)$$

где T – кинетическая энергия в поступательном движении центра масс робота; T_a – «энергия линейных ускорений» [6]; T^* – кинетическая энергия робота во вращательном движе-

нии относительно центра масс; T_ε^* – «энергия угловых ускорений». Уравнения Эйлера – Пуассона, обеспечивающие экстремум для (1):

$$\frac{\partial \Phi}{\partial q_i} - \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial \dot{q}_i} \right) + \frac{d^2}{dt^2} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial \ddot{q}_i} \right) = 0, \quad q_1 = x, q_2 = y, q_3 = \varphi, \quad (2)$$

$$\Phi = \frac{m\dot{x}^2}{2} + \frac{m\dot{y}^2}{2} + \frac{k_a\dot{x}^2}{2} + \frac{k_a\dot{y}^2}{2} + \frac{I\dot{\varphi}^2}{2} + \frac{k_\varepsilon\ddot{\varphi}^2}{2},$$

которые в дифференциальной форме примут вид:

$$\left[x^{(IV)} - \frac{m}{k_a} \ddot{x} = 0, y^{(IV)} - \frac{m}{k_a} \ddot{y} = 0, \varphi^{(IV)} - \frac{I}{k_\varepsilon} \ddot{\varphi} = 0, \right. \quad (3)$$

где k_a, k_ϵ – размерные коэффициенты, задаваемые в первом приближении экспертно. В интегральной форме законы движения определяются зависимостями:

$$\begin{cases} x = C_{11} + C_{12}t + C_{13}e^{kt} + C_{14}e^{-kt}, k = \sqrt{m/k_a} \\ y = C_{21} + C_{22}t + C_{23}e^{kt} + C_{24}e^{-kt}, \\ \varphi = C_{31} + C_{32}t + C_{33}e^{\tilde{k}t} + C_{34}e^{-\tilde{k}t}, \tilde{k} = \sqrt{I/k_\epsilon}. \end{cases} \quad (4)$$

$$I = \int_0^\tau \Phi(t, x, y, \varphi, \dot{x}, \dot{y}, \dot{\varphi}, \ddot{\varphi}) dt, \Phi = T + T^* + T_\epsilon^* - U, U = c \frac{(r - r_o)^2}{2}, \quad (5)$$

где U – потенциальная энергия поля, отталкивающего робот от границ препятствия; c – параметр поля (жесткость виртуальной пружины); r – радиус внутренней границы поля; r_o – радиус внешней границы поля (соответствующий недеформированному состоянию виртуальной пружины).

Значения неизвестных коэффициентов C_{ij} (констант интегрирования) рассчитываются исходя из заданных краевых условий: $x_0, y_0, \varphi_0, \dot{x}_0, \dot{y}_0, \dot{\varphi}_0; x_\tau, y_\tau, \varphi_\tau, \dot{x}_\tau, \dot{y}_\tau, \dot{\varphi}_\tau$.

Режим «2». Для поиска вида законов движения робота в данном режиме, предлагается использовать следующий критерий действия:

При применении формулы (2) для критерия (5) законы движения для 2-го режима примут вид (6)

$$\begin{cases} \ddot{x} = -\frac{c}{m} \left[(x - x_1) - r_0 \left[(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 \right]^{-0.5} (y - y_1) \right], \\ \ddot{y} = -\frac{c}{m} \left[(y - y_1) - r_0 \left[(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 \right]^{-0.5} (x - x_1) \right], \\ \varphi = C_{31} + C_{32}t + C_{33}e^{\tilde{k}t} + C_{34}e^{-\tilde{k}t}, \tilde{k} = \sqrt{I/k_\epsilon}. \end{cases} \quad (6)$$

Здесь в формуле (6) x_1 и y_1 – координаты центра препятствия в форме окружности. Значение параметра поля c определяется исходя из условия безударного обхода препятствия (формула (19), [4]).

Режим «3». В данном режиме используются законы движения в интегральной форме (4) с измененными граничными условиями: $x_{\tilde{\tau}}, y_{\tilde{\tau}}, \varphi_{\tilde{\tau}}, \dot{x}_{\tilde{\tau}}, \dot{y}_{\tilde{\tau}}, \dot{\varphi}_{\tilde{\tau}}$ – значения левой границы определяются в момент $\tilde{\tau}$, соответствующий выходу робота из поля; $x_{\tau-\tilde{\tau}} = x_\tau, y_{\tau-\tilde{\tau}} = y_\tau, \varphi_{\tau-\tilde{\tau}} = \varphi_\tau, \dot{x}_{\tau-\tilde{\tau}} = \dot{x}_\tau, \dot{y}_{\tau-\tilde{\tau}} = \dot{y}_\tau, \dot{\varphi}_{\tau-\tilde{\tau}} = \dot{\varphi}_\tau$ – значения на правой границе сохраняются, оперативное время уменьшается до $\tau - \tilde{\tau}$.

3. Компьютерное моделирование

Для тестирования предложенного подхода по автоматическому преодолению роботом статичного препятствия с учетом изменения его ориентации в 2D-пространстве используется примерный алгоритм навигации, представленный в статье [4]. Компьютерное моделирование движения робота осуществляется в модифицированной авторской программе, разработанной на языке Visual C++, с анимацией процесса дви-

жения и визуализация законов движения в виде графиков. Численное интегрирование для 2-го режима движения реализуется методом Эйлера.

Для серии численных экспериментов (рис. 2–4) были приняты постоянными следующие параметры:

1) параметры робота:

$$R = 1 \text{ м}; m = 1 \text{ кг}; r_L = 2 \text{ м}; k_a = 1 \text{ кг} \cdot \text{с}^2; k_\epsilon = 1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

2) параметры времени:

$$t_0 = 0 \text{ с}; \tau = 10 \text{ с}; dt = 0,02 \text{ с}.$$

Заключение

Анализ результатов численного тестирования показывает, что предложенный подход позволяет обеспечить обход статичного препятствия наземным роботом с учетом требуемого изменения его ориентации в 2D-пространстве при переходе из начальной точки в конечную. Законы изменения угловой ориентации робота, в рассмотренной постановке задачи, не зависят от положения центра масс робота. Предложенный подход может быть использован при разработке автоматических систем управления мобильных роботов, приводы которых обеспечивают независимость друг от друга координат робота: x, y, φ .

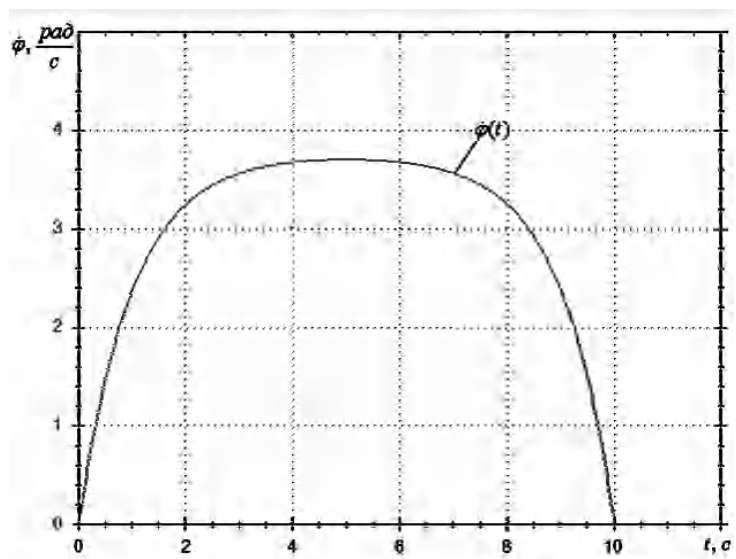
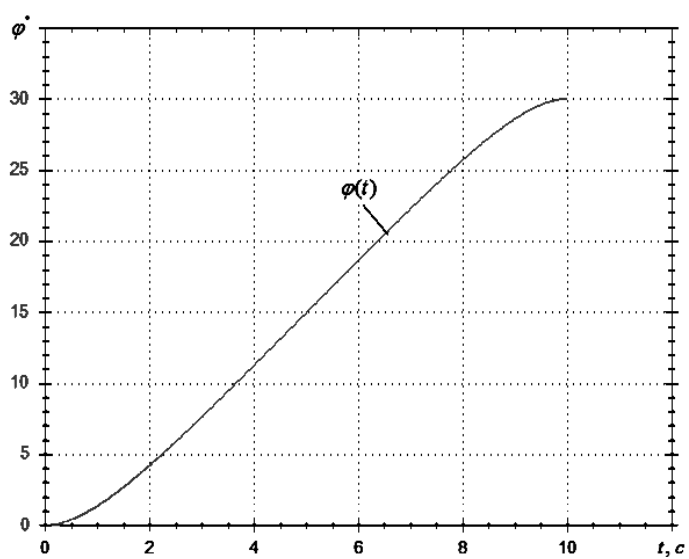
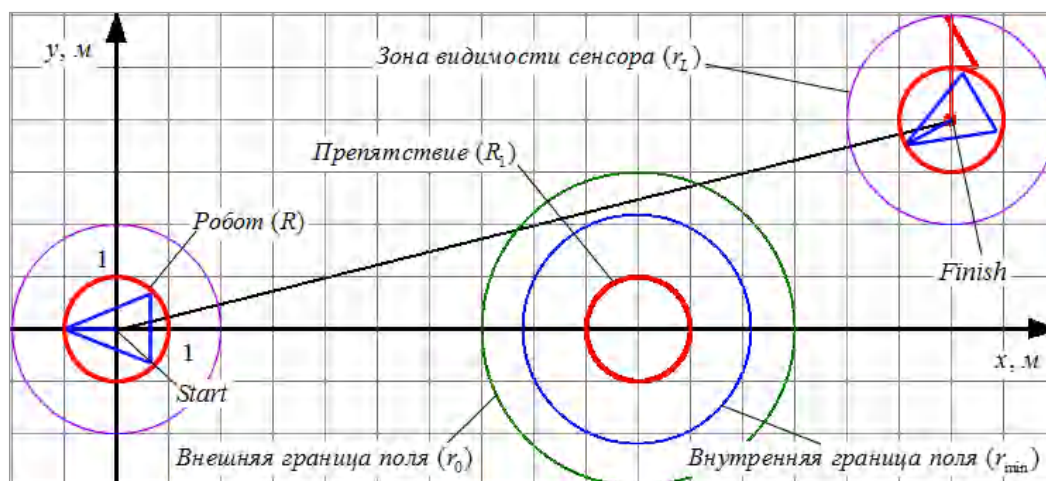


Рис. 2. Движение робота при нулевых начальных и конечных линейных и угловых скоростях: $\varphi_0 = 0^\circ$; $\varphi_\tau = 30^\circ$

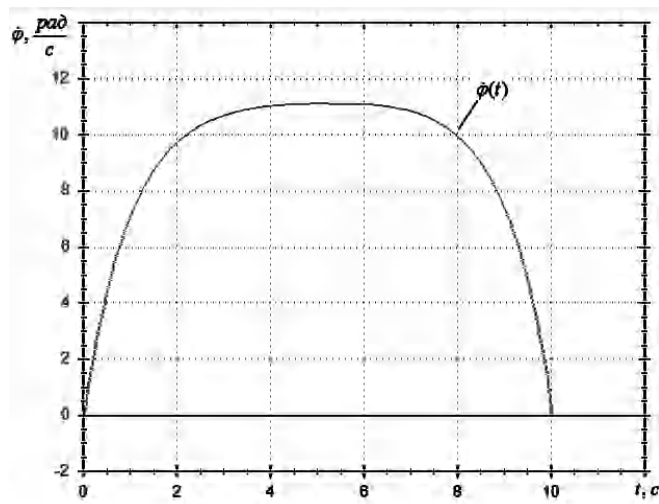
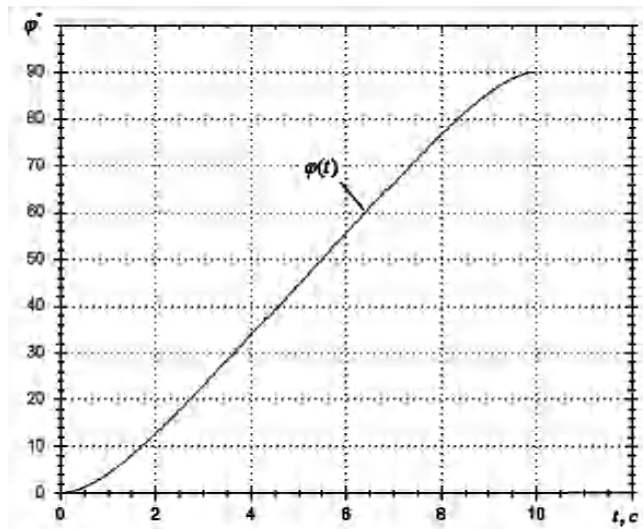
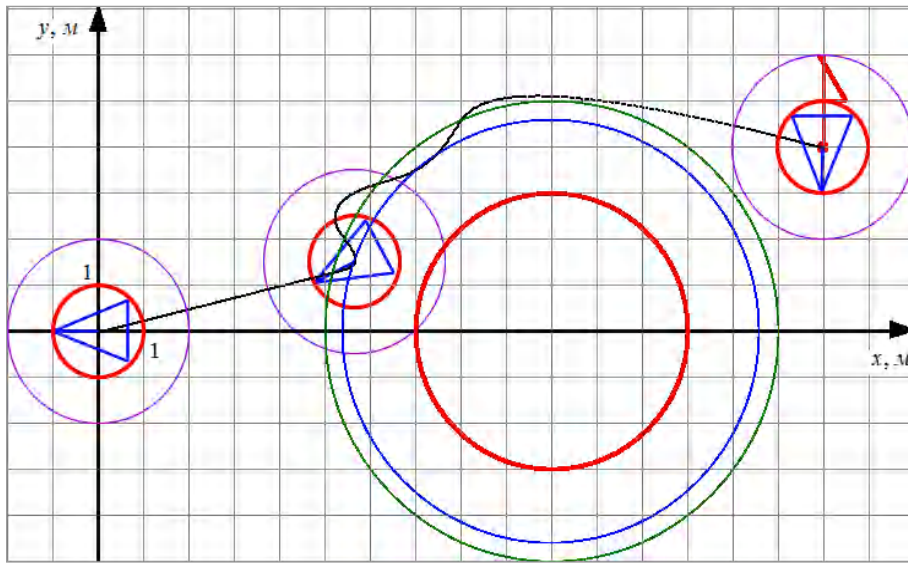


Рис. 3. Движение при нулевых начальных и конечных линейных и угловых скоростях: $\varphi_0 = 0^\circ$; $\varphi_\tau = 90^\circ$

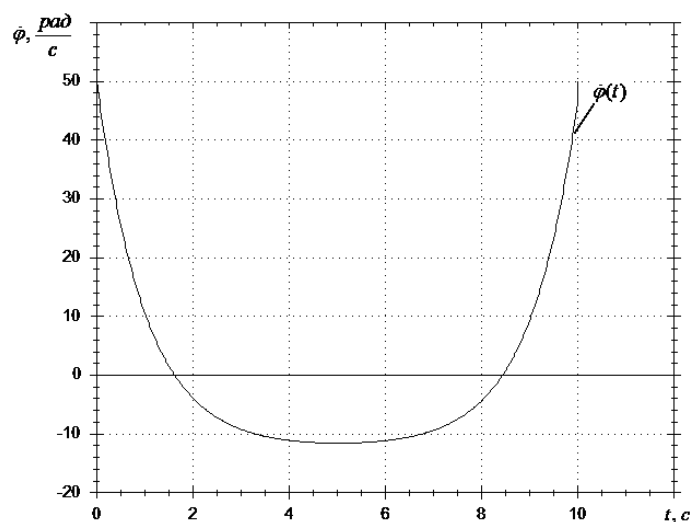
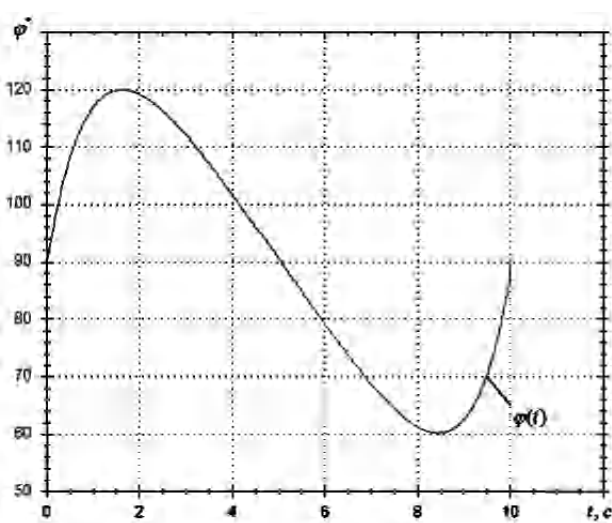
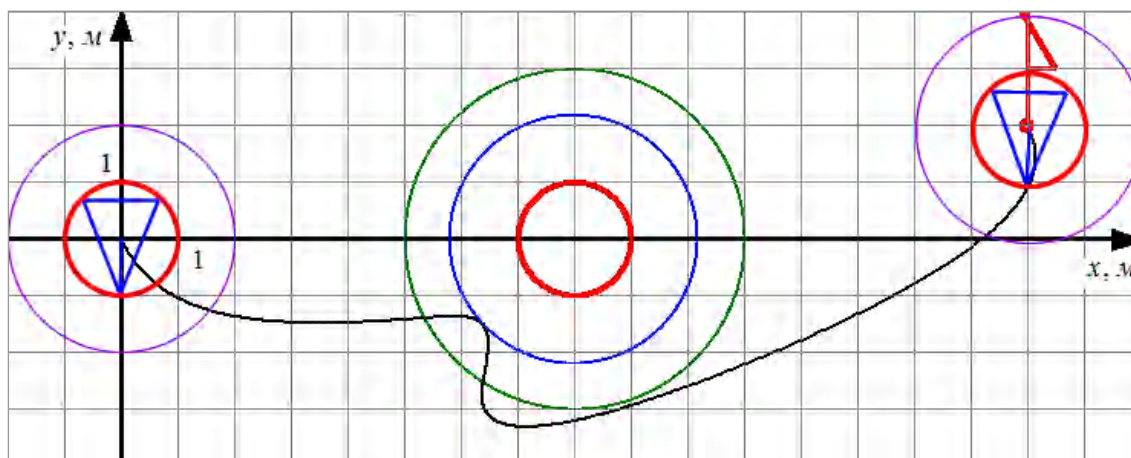


Рис. 4. Движение с произвольными начальными и конечными линейными и угловыми скоростями: $\varphi_0 = \varphi_T = 90^\circ$; $\dot{\varphi}_0 = \dot{\varphi}_T = 50$ рад/с

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Chunxi, Cheng*. Path planning and obstacle avoidance for AUV: A review / Chunxi Cheng, Qixin Sha, Bo He, Guangli-

ang // *Ocean Engineering*. – 2021. – Vol. 235. Article 109355.

2. *Казаков, К. А.* Обзор современных методов планирования движения / К. А. Казаков, В. А. Семенов // *Труды ИСП РАН*. – 2016. – Т. 28, вып. 4. – С. 241–294.

3. Лю, В. Методы планирования пути в среде с препятствиями (обзор) / В. Лю // Математика и математическое моделирование. – 2018. – № 1. – С. 15–58.

4. Леонард, А. В. Планирование движения наземного робота с обходом стационарного препятствия при заданных: начальных и конечных координатах, скоростях и оперативном времени ($VC/APF+BC_r^1$). Ч. I. Теория / А. В. Леонард // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 9 (268) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2022. – С. 34–42.

5. Леонард, А. В. Планирование движения наземного робота с обходом стационарного препятствия при задан-

ных: начальных и конечных координатах, скоростях и оперативном времени ($VC/APF+BC_r^1$). Ч. II. Результаты / А. В. Леонард // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 9 (268) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2022. – С. 42–48.

6. Гантмахер, Ф. Р. Лекции по аналитической механике : моногр. / Ф. Р. Гантмахер ; под ред. Е. С. Пятницкого. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2001. – 264 с. – ISBN 978-5-9221-0067-0. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL : <https://e.lanbook.com/book/47536> (дата обращения: 03.03.2023). – Режим доступа : для авториз. пользователей.

УДК 621.865

DOI 10.35211/1990-5297-2023-4-275-57-63

Е. А. Макарова, М. Ю. Ветлицын, Н. Г. Шаронов

АДАПТИВНЫЕ ЗАХВАТЫ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ*

Волгоградский государственный технический университет

m.lipka2015@yandex.ru, mikhail.vetlitsyn@vstu.ru

Рассматриваются адаптивные захватные устройства различных конструкций, анализируются принципы работы, преимущества и недостатки, особенности применения в различных условиях производства. Предложена классификация адаптивных захватов и приведены основные требования к подобным устройствам.

Ключевые слова: адаптивные захватные устройства (ЗУ), «мягкая» робототехника, рабочий элемент (actuator).

E. A. Makarova, M. Y. Vetlitsyn, N. G. Sharonov

ADAPTIVE GRIPPERS OF ROBOTIC SYSTEMS

Volgograd State Technical University

The article discusses adaptive grippers of various designs; the authors analyze the operating principle, their advantages and disadvantages, the features of application in various production conditions.

Keywords: adaptive grippers, soft robotics, actuator.

Необходимость работы с хрупкими или деформирующимися объектами сложной формы требует широкий спектр выполняемых захватами операций (загрузка станков, перемещение деталей, упаковка, сортировка на конвейерной ленте). Универсальность и гибкость в условиях производства позволяют отказаться от использования широкой номенклатуры узкоспециализированных устройств.

В области коллаборативной и «мягкой» робототехники [1] незаменимы адаптивные захваты, обеспечивающие безопасное и бережное взаимодействие манипуляторов с объектами на производстве. На сегодняшний день разработаны несколько типов устройств различных конструкций, многие из которых опираются на принцип работы руки человека. Применение коллаборативных роботов, оснащенных подоб-

ными устройствами и работающих в тесной кооперации с людьми, позволяет автоматизировать мелкосерийное производство и значительно повысить эффективность технологических процессов благодаря универсальности, гибкости этих систем [3, 4].

В статье описаны особенности адаптивных захватов. Захваты, используемые в промышленности, рассмотрены по следующим категориям: устройство, тип привода и область применения (рис. 1).

Конструкция захватных устройств включает привод, основание захвата и прикрепленные к нему рабочие элементы [2]. Пальцы, при помощи которых осуществляется захватывание, могут быть выполнены из жестких и мягких (силиконы, резина, желатин-глицериновые композиты) материалов (рис. 2).

© Макарова Е. А., Ветлицын М. Ю., Шаронов Н. Г., 2023.

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-01589, <https://rscf.ru/project/22-29-01589/>



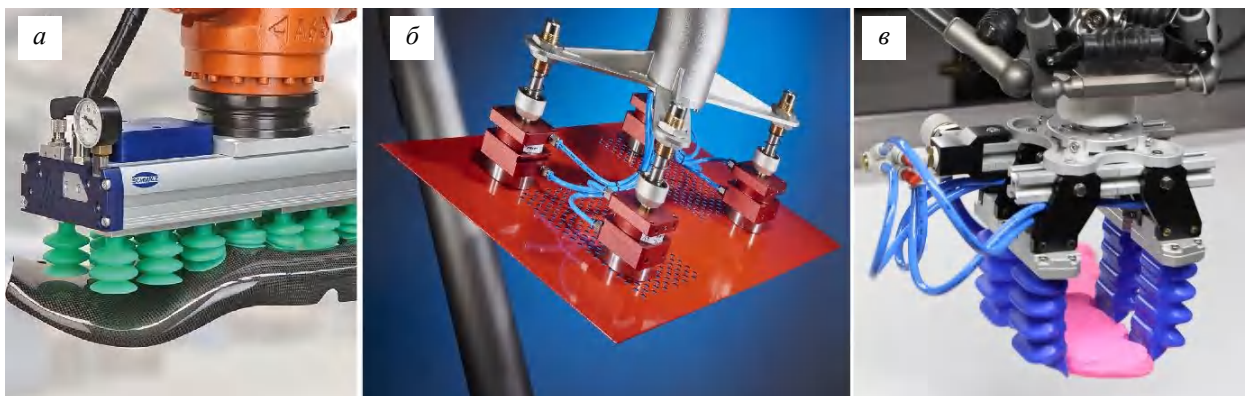
Рис. 1. Классификация захватных устройств

Вакуумные захваты (рис. 2, *а*) снабжены присосками, которые обеспечивают надежное закрепление объектов с большой плоской поверхностью. Детали с большим весом, сложной формой или неровными поверхностями требуют применения большого количества присосок или захвата другого типа.

Для перемещения металлических изделий с ребристыми, решетчатыми или перфорированными поверхностями могут использоваться магнитные захваты (рис. 2, *б*). Эти устройства отличаются быстродействием и простотой конструкции. Возможность их применения ограни-

чена неспособностью схватывать немагнитные объекты; также имеет место остаточный магнетизм на деталях.

Захваты с эластичными (пневматическими или гидравлическими) камерами (рис. 2, *в*) используются для взаимодействия с хрупкими изделиями небольшого веса и неправильной формы. Принцип работы данных устройств основан на деформации эластичной камеры под действием давления. В конструкции захватов могут использоваться и гибкие элементы, изменяющие свою геометрию при взаимодействии с объектом манипулирования [5].

Рис. 2. Различные конструкции захватных устройств:
а – вакуумные захваты; *б* – магнитные захваты; *в* – захваты с эластичными актуаторами

Наиболее часто в захватных устройствах используется пневмо-, гидро- и электропривод. Пневматический привод имеет высокую сте-

пень быстродействия, является простым и экономичным, а также способен работать в условиях пыльной окружающей среды. В то же

время грузоподъемность и КПД устройств ограничены (5–15 %).

Захваты с гидроприводом наиболее мощные, обладают высокими статическими и динамическими характеристиками, что обуславливает их применение в операциях перемещения тяжелых объектов (от 100 кг). Использование устройств сопряжено с риском нарушения герметичности системы [2].

В пищевой и медицинской промышленности применяются захваты, снабженные электроприводом, так как использование пневмо- и гидропривода ограничено из-за рисков попадания в продукцию капель масла. Устройства отличаются КПД, высокая точность управления с возможностью контролировать положение пальцев, усилие и скорость закрытия захвата; это, в свою очередь, делает их более дорогостоящими.

Захватные устройства с эластичными актуаторами принято называть адаптивными захватами. Под адаптивностью подразумевается способность выполнять задания, подстраивая свое поведение под воздействием внешней среды [1].

Адаптивные захваты отличает способность приспосабливаться к форме схватываемого объекта; взаимодействовать с мягкими и хрупкими предметами сложной формы без их деформации [2]. Это достигается путем снабжения устройств датчиками или создания пассивных систем, подстраивающихся под характеристики конкретных объектов.

Существующие и перспективные конструкции адаптивных захватных устройств могут быть классифицированы по жесткости рабочих элементов:

1. Жесткие адаптивные захваты

К данным захватам относятся устройства с жесткими рабочими элементами (пальцами). Наиболее распространены универсальные адаптивные захваты с жесткими подвижными пальцами. Адаптивность устройств Robotiq 2F-85 OnRobot RG2 достигается с помощью контроля усилия посредством датчиков. Изменяющийся угол захвата между пальцами позволяет схватывать объекты разных форм, материалов и размеров (рис. 3).



Рис. 3. Захватные устройства с жесткими рабочими элементами

Перемещаемые устройством детали или заготовки могут быть как абсолютно твердыми, так и упругими или даже хрупкими. Кончики пальцев захвата съемные, и могут быть изготовлены специально для нужд конкретной производственной линии [6].

Данные устройства обеспечивают высокую точность позиционирования объектов и грузоподъемность, достаточную для выполнения 90 % задач по загрузке станков с ЧПУ. Автоматические алгоритмы индикации захвата и расчета полезной нагрузки уменьшают время вво-

да устройства в эксплуатацию и упрощают его программирование. Использование подобных захватов позволяет автоматизировать мелкосерийное производство с широким ассортиментом продукции [7].

К категории жестких адаптивных захватов также можно отнести антропоморфные захваты, опирающиеся на принцип действия руки человека. Например, предложена конструкция пассивного захватного устройства [8], приводимого в движение встроенным в ладонь электромотором. Каждый палец имеет два или три

сустава со связочно-пружинным механизмом, который обеспечивает быстрое сгибание пальцев (рис. 4).

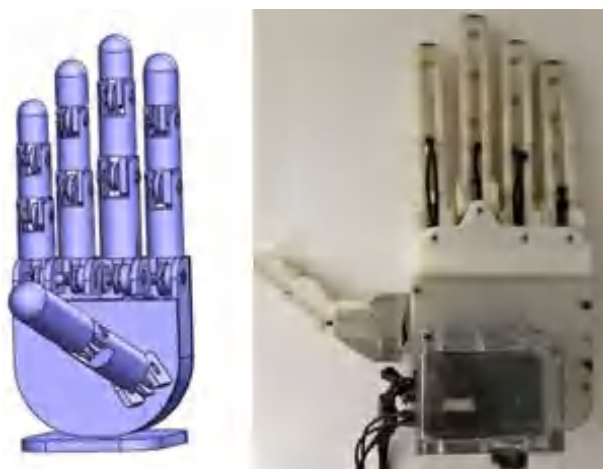


Рис. 4. Конструкция антропоморфного захвата

Для осуществления схвата происходит полное открытие руки, затем под действием системы пружин пальцы смыкаются, адаптируясь под форму объекта. Использование лишь одного привода позволяет облегчить и удешевить конструкцию.

Подобные антропоморфные захваты рассматриваются в исследованиях [9–11], но, несмотря на описанные в статьях перспективы, эти устройства почти не используются в промышленности и на производстве. Применение их в качестве протезов также затруднено из-за ограниченности подвижности большого пальца и сложностей с управлением и со схватыванием деформируемых объектов в условиях повседневной жизни [12]. На данный момент антропоморфные руки используются лишь в образовательных целях.

2. «Мягкие» адаптивные захваты (Soft Robotic Grippers)

К данным захватам относятся адаптивные захваты с мягкими или частично мягкими рабочими элементами (рис. 5). Одним из их главных преимуществ является возможность подстраиваться под форму и размер объектов, неудобных для схватывания жесткими устройствами. Мягкость пальцев оказывается важным фактором снижения возможных травм при взаимодействии манипулятора с людьми [3]. Это делает мягкие захваты одной из ключевых составляющих кооперативных роботов, применяемых как на производстве, так и в быту.

Физические параметры используемых в рабочих элементах мягких материалов (макси-

мальная упругая деформация, жесткость) определяют характеристики и возможности (максимальное усилие, быстродействие) самого устройства. Выбор и разработка материала становятся важными составляющими проектирования всего захвата [12]. Для рабочих элементов, изготовленных по технологии 3D-печати, отмечается большая однородность, но более низкая долговечность по сравнению с элементами, выполненными методом литья [13, 14].

Достаточно высокая эластичность и грузоподъемность рабочего элемента позволяет применять его на производстве, при этом способность взаимодействовать с легко деформируемыми объектами широко используется при автоматизации упаковки в пищевой промышленности.



Рис. 5. Промышленные захватные устройства с силиконовыми рабочими элементами различных конструкций

В статье [15] предложена конструкция съедобного «актуатора» (*actuator*) для захватного устройства. Рабочий элемент выполнен из безопасного и биоразлагаемого желатин-глицеринового композита, что позволяет использовать его в пищевой и медицинской промышленности. Рассматриваемый «актуатор» обладает производительностью и механическими свойствами, сравнимыми с таковыми у изготовленных на основе силиконовых эластомеров.

В исследовании [16] предложена конструкция тросового робота с мягким трехпальцевым силиконовым захватом для взаимодействия с хрупкими объектами. Манипулятор состоит из двух независимых секций с проходящими по

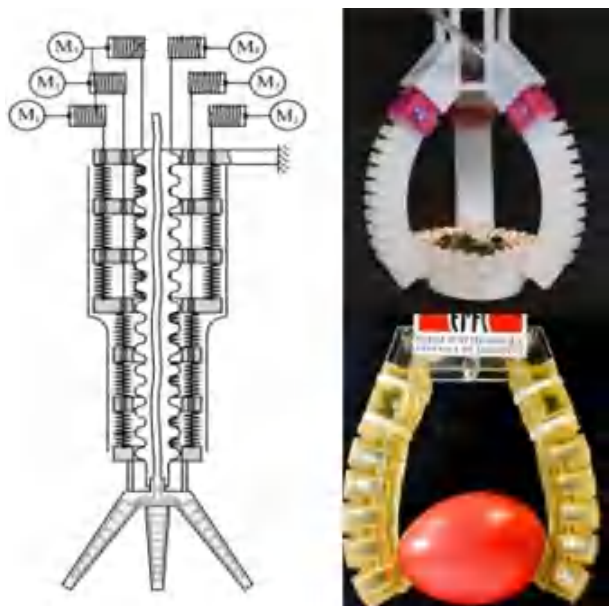


Рис. 6. Перспективные конструкции

ним приводными тросами и системой пружин, которые делают движения механизма более плавными (рис. 6). Используемый принцип работы обеспечивает гибкость робота, позволяет

ему совершать растягивающие и волнообразные движения. Одним из недостатков конструкции является невозможность точного позиционирования вследствие низкой жесткости устройства, что может вызывать дополнительные трудности при применении на производстве.

В манипуляторах может применяться захват, основанный на принципе работы рыбьего плавника (Fin Ray Effect). Мягкие пальцы выполнены в форме прямоугольного треугольника с жесткими перегородками, что позволяет им подстраиваться под форму объекта при деформации (рис. 7). Ассиметричная конструкция дает возможность закрепить предпочитаемое направление изгиба и снизить необходимое для схватывания усилие. Устройство отличается простотой изготовления и сборки; в то же время при выполнении ряда задач возникают трудности из-за неспособности приложить требуемую силу для удержания объекта [17]. Необходимость определенного позиционирования захвата по отношению к объекту для эффективного схватывания повышает требования к манипулятору (в частности, к количеству его степеней свободы).

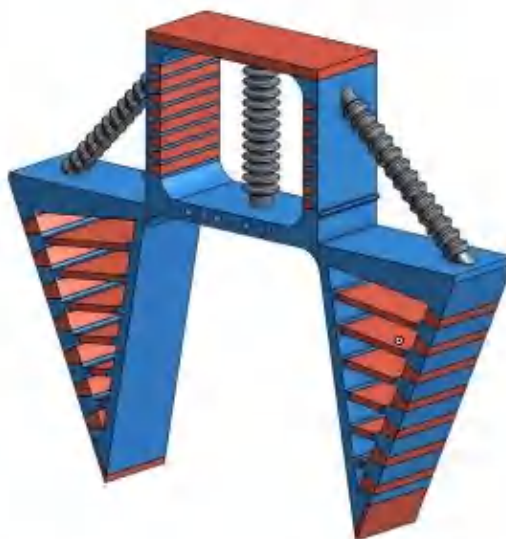


Рис. 7. Захваты, основанные на эффекте плавника

Одним из примеров захватов с эластичными силиконовыми пальцами, активно используемых на производстве, являются мягкие захваты Soft Gripper и OnRobot Soft Gripper [18, 19]. Данные устройства получили широкое применение в упаковке продуктов питания в пищевой промышленности. Мягкость и гибкость рабо-

чих элементов позволяют устройству работать с деформирующимися объектами сложной формы; количество актуаторов и их взаимное расположение выбирается с учетом требований конкретной производственной линии. Сравнение различных адаптивных ЗУ представлено ниже в таблице.

Достоинства и недостатки различных адаптивных ЗУ

Тип захвата	Устройство	Достоинства	Недостатки
Жесткие ЗУ	Универсальные адаптивные ЗУ (Robotiq 2F-85; OnRobot RG2)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Точное позиционирование относительно схватываемого объекта. 2. Возможность контроля усилия и скорости смыкания пальцев. 3. Система контроля схватывания. 4. Съёмные кончики пальцев захвата, изготавливаемые для конкретных задач. 5. Простота интегрирования. 6. Грузоподъемность (5 кг) 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Высокая цена из-за наличия системы датчиков
	Антропоморфные ЗУ	<ol style="list-style-type: none"> 1. Наглядность – возможность использования в образовательных целях 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Сложности с интеграцией и использованием в условиях производства. 2. Ограниченность подвижности пальцев. 3. Сложности с управлением и схватыванием деформируемых объектов
«Мягкие» ЗУ (Soft Robotic Grippers)	Рабочий элемент с силиконовой камерой (Soft Gripper; OnRobot Soft Gripper)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Схватывание хрупких объектов без деформирования. 2. Схватывание объектов сложной формы за счет мягкости и гибкости рабочих элементов. 3. Возможность изготовления пальцев методами литья или 3D-печати; а также использования безопасных биоразлагаемых материалов 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Небольшая точность позиционирования вследствие низкой жесткости устройства. 2. Более низкая грузоподъемность. 3. Неспособность создавать большое усилие из-за эластичной структуры. 4. Невысокие показатели скорости и надежности. 5. Сложности с интеграцией датчиков и управления
	ЗУ, основанное на эффекте рыбьего плавника (Fin Ray Effect)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Возможность подстраиваться под форму и размер объектов. 2. Схватывание хрупких объектов без деформирования. 3. Простота изготовления и сборки 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Небольшая точность позиционирования. 2. Более низкая грузоподъемность. 3. Неспособность создавать большое усилие. 4. Низкая скорость. 5. Необходимость определенного позиционирования захвата по отношению к объекту для эффективного схватывания

Недостатками мягких захватов являются неспособность создавать большое усилие из-за их эластичной структуры, а также небольшие скорость и точность [3, 20]. Ряд сложностей также связан с надежностью пальцев и инте-

грацией датчиков и управления. Для улучшения характеристик и возможностей устройств применяют усовершенствованные материалы и методы обработки [12].

Адаптивные захваты являются наиболее

эффективным решением для взаимодействия с большим спектром объектов. Для автоматизации мелкосерийного производства рациональным является использование устройств с жесткими подвижными пальцами, обеспечивающих достаточную грузоподъемность и точное позиционирование.

В свою очередь, захваты с мягкими рабочими элементами из безопасных нетоксичных материалов получили применение в медицинской и пищевой промышленности. Устройства способны работать с хрупкими и деформируемыми объектами, но уступают по быстродействию и надежности более жестким моделям.

Как показал проведенный анализ, к адаптивным захватам предъявляют повышенные (по сравнению со специализированными устройствами) требования к их быстродействию, надежности и безопасности (нетоксичности) в условиях производства.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- ГОСТ Р 60.0.0.4-2019/ИСО 8373:2012 Роботы и робототехнические устройства. Термины и определения – docs.cntd.ru [Электронный ресурс] // Электронный фонд правовой и нормативно-технической информации – docs.cntd.ru. – Режим доступа : <https://docs.cntd.ru/document/1200162703?section=text>, свободный (дата обращения: 12.02.2023).
- Козырев, Ю. Г. Захватные устройства и инструменты промышленных роботов : учеб. пособие / Ю. Г. Козырев. – М. : КноРус, 2020. – 310 с.
- Спасский, Б. А. Мягкая робототехника в кооперативных задачах: состояние и перспективы развития / Б. А. Спасский, В. В. Титов, И. В. Шардыко // Робототехника и техническая кибернетика. – 2018. – №. 1. – С. 14–25.
- Галин, Р. Р. Влияние коллаборативных робототехнических решений на повышение эффективности деятельности человека / Р. Р. Галин, П. М. Трефилов // Сборник тезисов 30-й Международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника». – 2019. – С. 466–468.
- Festo Multi Choice Gripper [Электронный ресурс] // Automation technology and technical education solutions | Festo GB. – Режим доступа : https://www.festo.com/net/en-gb_gb/SupportPortal/Files/333986/Festo_MultiChoiceGripper_en.pdf, свободный (дата обращения: 12.02.2023).
- 2F-85 and 2F-140 Grippers – Robotiq [Электронный ресурс] // Start Production Faster – Robotiq. – Режим доступа : https://robotiq.com/products/2f85-140-adaptive-robot-gripper?ref=nav_product_new_button, свободный (дата обращения: 12.02.2023).
- RG2 Gripper – Flexible 2 Finger Robot Gripper | OnRobot [Электронный ресурс] // One Stop Shop for Collaborative Robot Applications | EOAT and End Effectors | OnRobot. – Режим доступа : <https://onrobot.com/en/products/rg2-gripper>, свободный (дата обращения: 12.02.2023).
- Shi, J. Research of Passive Grasp Multi-fingered Robot Hand / J. Shi, W. Zhang // Informatics in Control, Automation and Robotics: Volume 2. – Springer Berlin Heidelberg. – 2012. – С. 431–437.
- Nikafrooz, N. A single-actuated, cable-driven, and self-contained robotic hand designed for adaptive grasps / N. Nikafrooz, A. Leonessa // Robotics. – 2021. – Т. 10. – № 4. – С. 109.
- Антропоморфная кисть / Д. О. Дохов, И. И. Саитов, Д. Н. Новиков, Н. В. Заруцкий // Труды 33-й Международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника». – 2022. – С. 152–156.
- Дохов, Д. О. Палец антропоморфной кисти / Д. О. Дохов, Ш. Калымбеков, И. А. Горбачев // Вопросы развития современной науки и техники. – 2021. – №. 5. – С. 91–100.
- Soft robotic grippers / J. Shintake, V. Cacucciolo, D. Floreano, H. Shea // Advanced materials, 2018, 30 (29), 1707035.
- Comparison of different soft grippers for lunch box packaging / Z. Wang, M. Zhu, S. Kawamura, S. Hirai // Robotics and biomimetics. – 2017. – Т. 4. – № 1. – С. 1–9.
- Рабочий элемент мягкого захватного устройства / Е. Б. Щелкунов, С. В. Виноградов, М. Е. Щелкунова, В. А. Карпенко // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2021. – № 5. – С. 70–78.
- Soft pneumatic gelatin actuator for edible robotics / J. Shintake, H. Sonar, E. Piskarev, J. Paik, D. Floreano // 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). – IEEE, 2017. – С. 6221–6226.
- Карпенко, В. А. Тросовый робот для манипулирования хрупкими и нежесткими объектами / В. А. Карпенко, Е. Б. Щелкунов // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований. – 2021. – С. 50–52.
- Fin ray® effect inspired soft robotic gripper: From the robosoft grand challenge toward optimization / W. Crooks, G. Vukasin, M. O’Sullivan, W. Messner, C. Rogers // Frontiers in Robotics and AI. – 2016. – Т. 3. – С. 70.
- The modular design system for flexible gripping. Product Catalog 2022 [Электронный ресурс] // Best Soft Gripper Manufacturer in 2023 – SoftGripping. – Режим доступа : https://softgripping.com/assets/downloads/SoftGripping_Catalogue.pdf, свободный (дата обращения: 12.02.2023).
- Soft Gripper | Гибкое захватное устройство для применения в пищевой промышленности | Подходит для хрупких объектов | OnRobot [Электронный ресурс] // One Stop Shop for Collaborative Robot Applications | EOAT and End Effectors | OnRobot. – Режим доступа : <https://onrobot.com/ru/products/soft-gripper>, свободный (дата обращения: 12.02.2023).
- Soft robot review / C. Lee, M. Kim, Y. J. Kim, N. Hong, S. Ryu, H. J. Kim, S. Kim // International Journal of Control, Automation and Systems. – 2017. – Т. 15. – С. 3–15.

УДК 531.8

DOI 10.35211/1990-5297-2023-4-275-64-71

*Е. А. Марчук***О ЧИСЛЕННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ОБЛАСТИ РАБОЧЕГО ПРОСТРАНСТВА ГИБРИДНОГО ТРОСОВОГО РОБОТА***

Университет Иннополис

e.marchuk@innopolis.ru

В статье описывается методика численного моделирования области рабочего пространства гибридного параллельного тросового робота. Методика основывается на использовании методов линейной алгебры в комбинации с обработкой данных трехосевого гироскопа в реальном времени. На основании данных, полученных с гироскопа, строится матрица поворотов и решается прямая задача кинематики неполноприводного параллельного тросового робота. С учетом рассчитанного на основании показаний гироскопа положения центра масс мобильной платформы осуществляется коррекция положения рабочего инструмента робота. Коррекция положения рабочего инструмента выполняется с использованием платформы Стюарта. Моделируется область рабочего пространства робота с ограничениями по допустимым отклонениям рабочего инструмента от заданного положения в исходной конфигурации и с использованием платформы Стюарта.

Ключевые слова: рабочее пространство, численное моделирование, платформа Стюарта, тросовый робот.

*Е. А. Marchuk***ON NUMERICAL MODELING OF WORKSPACE OF HYBRID CABLE-DRIVEN PARALLEL ROBOT**

Innopolis University

The article deals with a problem of numerical modeling of workspace of hybrid cable-driven parallel robot. The method is based on using linear algebra in a combination with data obtained from three-axis gyroscope in a real time. Using the data from gyroscope rotation matrix can be composed and the problem of forward kinematics can be solved. Then the errors of end-effector of the robot can be corrected using calculated position and orientation of the mobile platform. Finally, workspace of the robot has been modeled in two cases, with basic configuration and with hybrid configuration which includes Stewart platform.

Keywords: workspace, numerical simulation, Stewart platform, cable-driven robot.

Введение

Параллельные тросовые роботы являются обособленной группой среди промышленных роботов с параллельной структурой кинематических цепей. Практическое использование параллельных тросовых роботов началось с конца 80-х гг. XX века. Первыми примерами можно считать платформы Стюарта с тросовым приводом, стабилизирующие подъемные краны морских платформ [1, 2]. В последующее десятилетие, на протяжении 90-х гг. XX века, происходило формирование научной проблематики параллельных тросовых роботов. Большинство проблем были принципиально решены и описаны в научных статьях, к примеру [3–6]. Уже с первого десятилетия XXI века тросовые роботы начинают широко использоваться в специфических областях применения – там, где необходимо перемещение объектов в рабочем пространстве большого объема [7, 8]. Несмотря на массовое использование квадрокоптеров при

фото- и видеосъемке массовых мероприятий, при видеосъемке стадионов продолжают использоваться камеры, перемещающиеся на тросовых системах. Тросовые роботы хорошо подходят по своим механическим характеристикам для перемещения грузов на больших площадях и в большом объеме рабочего пространства. Перспективной областью использования тросовых роботов видится монолитное строительство методом 3D-печати с использованием экструдера в качестве рабочего инструмента тросового робота [9].

В историческом контексте тросовые подъемные механизмы (лебедки и подъемные краны) были известны в античном и средневековом периоде как западным, так и восточным цивилизациям [10]. В письменных источниках, начиная с XVII века, встречаются описания корейских и китайских подъемных кранов, кинематические схемы которых идентичны современным тросовым роботам [11].

© Марчук Е. А., 2023.

* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 22-29-01618.

Тросовые системы обладают специфическими свойствами: тросы способны к провисанию, а также, с точки зрения механики, тросы являются односторонними связями. При проектировании тросовых систем следует учитывать геометрическую и структурную нелинейность тросов. Как правило, в математическом описании тросов при инженерном проектировании объектов используется теория тяжелой гибкой нити. Однако, при условии сильного натяжения и малой массы тросов, в математической модели тросовых роботов может приниматься допущение об исключе-

нии геометрической нелинейности тросов, и, таким образом, тросы считаются растяжимыми стержнями [12]. Конечно-элементные модели шлангов и тросов, а также сложные полуэмпирические модели витых стальных канатов в контексте настоящей работы не рассматриваются [13–16].

Далее производится описание математической модели неполноприводного параллельного тросового робота на примере четырехтросового гибридного робота, предназначенного для печати объектов с использованием аддитивных технологий (рис. 1).



Рис. 1. Схематичное изображение пространственного четырехтросового параллельного робота и модели рабочего инструмента с использованием платформы Стюарта (Университет Иннополис)

Моделирование механики параллельного тросового робота

Наиболее часто в научной литературе приводятся рекомендации по проектированию параллельных тросовых роботов исходя из предположения о том, что тросы натянуты сильно и не провисают [5, 6]. Данное предположение исключает геометрическую нелинейность тросов из математической модели. Обозначенный подход удобен при построении математической модели робота, поскольку делает возможным использование общеизвестных методов линейной алгебры. В векторном представлении кинематика тросовой системы приобретает вид:

$$\mathbf{l}_i = \mathbf{a}_i - \mathbf{R}\mathbf{b}_i - \mathbf{r}, \quad (1)$$

где \mathbf{l}_i – вектор, соединяющий точку схода i -го троса с направляющего ролика с точкой крепления троса к рабочему инструменту робота; \mathbf{a}_i – вектор, соединяющий начало неподвижной системы координат с точкой схода i -го троса с направляющего ролика; \mathbf{R} – матрица поворота; \mathbf{b}_i – вектор, соединяющий начало подвижной

системы координат с точкой крепления троса к рабочему инструменту робота; \mathbf{r} – радиус-вектор, соединяющий начало неподвижной системы координат с началом подвижной системы координат.

Матрица Якоби используется для перевода скоростей из пространства конфигураций в операционное пространство робота. Для параллельного четырехтросового робота матрица приобретает вид:

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \frac{\mathbf{l}_1}{\|\mathbf{l}_1\|_2} & \dots & \frac{\mathbf{l}_4}{\|\mathbf{l}_4\|_2} \\ \mathbf{b}_1 \times \frac{\mathbf{l}_1}{\|\mathbf{l}_1\|_2} & \dots & \mathbf{b}_4 \times \frac{\mathbf{l}_4}{\|\mathbf{l}_4\|_2} \end{bmatrix}^{6 \times 4}. \quad (2)$$

Поскольку геометрическая матрица Якоби данного робота имеет больше строк, чем столбцов, следует заметить, что не всякое желаемое значение вектора обобщенных координат является достижимым. В конкретном случае неуправляемыми становятся угловые координаты крена и тангажа мобильной платформы.

Также матрица (2) используется при переводе сил и моментов в обозначенных выше пространствах. Динамика параллельного тросового робота в таком случае описывается матричной формой уравнения движения твердого тела:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{D}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{g}_c = -\mathbf{w}_p + \mathbf{J}\mathbf{f}, \quad (3)$$

где \mathbf{q} – вектор обобщенных координат; \mathbf{M} – матрица масс; \mathbf{D} – матрица затухания; \mathbf{g}_c – фактор воздействия центробежной и кориолисовой сил, \mathbf{w}_p – динамический винт внешних сил; \mathbf{J} – матрица Якоби; \mathbf{f} – вектор сил натяжений в тросах.

С учетом конструктивной нелинейности тросов, сила натяжения каждого i -го троса выражается с использованием функции активации:

$$f = f^* \cdot \alpha \cdot \tanh(\Delta l + \beta), \quad (4)$$

где α , β – некоторые константы, и сила f^* находится в соответствии с моделью Фойгта:

$$f^* = ES \frac{\Delta l}{l_0} + \eta S \frac{\Delta \dot{l}}{l_0}, \quad (5)$$

где E – модуль Юнга материала троса; S – площадь поперечного сечения троса; η – динамическая вязкость материала троса; l_0 – длина троса в недеформированном состоянии; Δl – величина деформации троса.

Уравнение (3) решается с использованием численных методов, например Рунге – Кутты или Адамса – Башфорта.

получим:

$$L_i^2 = x^2 + y^2 + z^2 + (a_{i1} - b'_{i1})^2 + (a_{i2} - b'_{i2})^2 + (a_{i3} - b'_{i3})^2 - 2x(a_{i1} - b'_{i1}) - 2y(a_{i2} - b'_{i2}) - 2z(a_{i3} - b'_{i3}), \quad (13)$$

что является уравнением сферы:

$$L_i^2 = (x - (a_{i1} - b'_{i1}))^2 + (y - (a_{i2} - b'_{i2}))^2 + (z - (a_{i3} - b'_{i3}))^2. \quad (14)$$

Четыре сферы, соответствующие описанию четырехтросового робота, пересекаются в двух точках, одна из которых соответствует реаль-

Решение прямой задачи кинематики неполноприводного параллельного тросового робота

В общем случае прямая задача кинематики неполноприводного параллельного тросового робота не имеет единственного решения по причине неопределенности системы уравнений, описывающих замкнутую кинематическую цепь робота. Однако решение возможно получить, используя дополнительные условия. Известны несколько методов, наиболее распространенные упоминаются в работе [17].

При оборудовании мобильной платформы робота инерциальным модулем становится возможным использовать данные гироскопа, формирующие матрицу поворота \mathbf{R} . Тогда введем обозначение \mathbf{b}'_i и запишем (1) в виде:

$$\mathbf{l}_i = \mathbf{a}_i - \mathbf{b}'_i - \mathbf{r}. \quad (6)$$

Преобразуем выражение (6) таким образом, что:

$$\mathbf{l}_i^T \mathbf{l}_i = (\mathbf{a}_i - \mathbf{b}'_i - \mathbf{r})^T (\mathbf{a}_i - \mathbf{b}'_i - \mathbf{r}), \quad (7)$$

$$|\mathbf{l}_i|^2 = |\mathbf{a}_i - \mathbf{b}'_i|^2 - 2(\mathbf{a}_i - \mathbf{b}'_i)^T \mathbf{r} + |\mathbf{r}|^2. \quad (8)$$

Раскрыв скобки:

$$|\mathbf{a}_i - \mathbf{b}'_i|^2 = (a_{i1} - b'_{i1})^2 + (a_{i2} - b'_{i2})^2 + (a_{i3} - b'_{i3})^2, \quad (9)$$

$$(\mathbf{a}_i - \mathbf{b}'_i)^T \mathbf{r} = x(a_{i1} - b'_{i1}) + y(a_{i2} - b'_{i2}) + z(a_{i3} - b'_{i3}) \quad (10)$$

и введя замены:

$$|\mathbf{l}_i|^2 = L_i^2, \quad (11)$$

$$|\mathbf{r}|^2 = x^2 + y^2 + z^2, \quad (12)$$

ному положению центра масс мобильной платформы. Для решения задачи достаточно трех произвольно выбранных уравнений сфер:

$$\begin{cases} L_1^2 = (x - (a_{11} - b'_{11}))^2 + (y - (a_{12} - b'_{12}))^2 + (z - (a_{13} - b'_{13}))^2 \\ L_2^2 = (x - (a_{21} - b'_{21}))^2 + (y - (a_{22} - b'_{22}))^2 + (z - (a_{23} - b'_{23}))^2 \\ L_3^2 = (x - (a_{31} - b'_{31}))^2 + (y - (a_{32} - b'_{32}))^2 + (z - (a_{33} - b'_{33}))^2 \end{cases} \quad (15)$$

Вычитая из первого уравнения системы второе и из первого уравнения – третье, полу-

чим уравнения плоскостей, проходящих через линии пересечения двух сфер (рис. 2). Пересе-

чением двух полученных плоскостей является прямая линия, которая в параметрической форме описывается системой уравнений:

$$\begin{cases} x = at + x_0 \\ y = bt + y_0 \\ z = ct + z_0 \end{cases} \quad (16)$$

и в векторной форме имеет вид:

$$\mathbf{r} = \mathbf{u}t + \mathbf{r}_0, \quad (17)$$

где \mathbf{u} – вектор, параллельный линии пересечения плоскостей; \mathbf{r}_0 – точка на линии пересечения плоскостей; t – некоторая переменная.

Вектор \mathbf{u} определяется как векторное произведение нормальных векторов к рассматриваемым плоскостям. Затем находится точка, которая принадлежит обоим плоскостям, то есть лежит на линии их пересечения. Третья переменная в уравнениях плоскостей принимается равной некоторой константе, и решается система из двух уравнений с двумя неизвестными, что является типичной задачей аналитической геометрии.

Описанный выше метод решения прямой задачи кинематики позволяет производить вычисления в режиме реального времени.

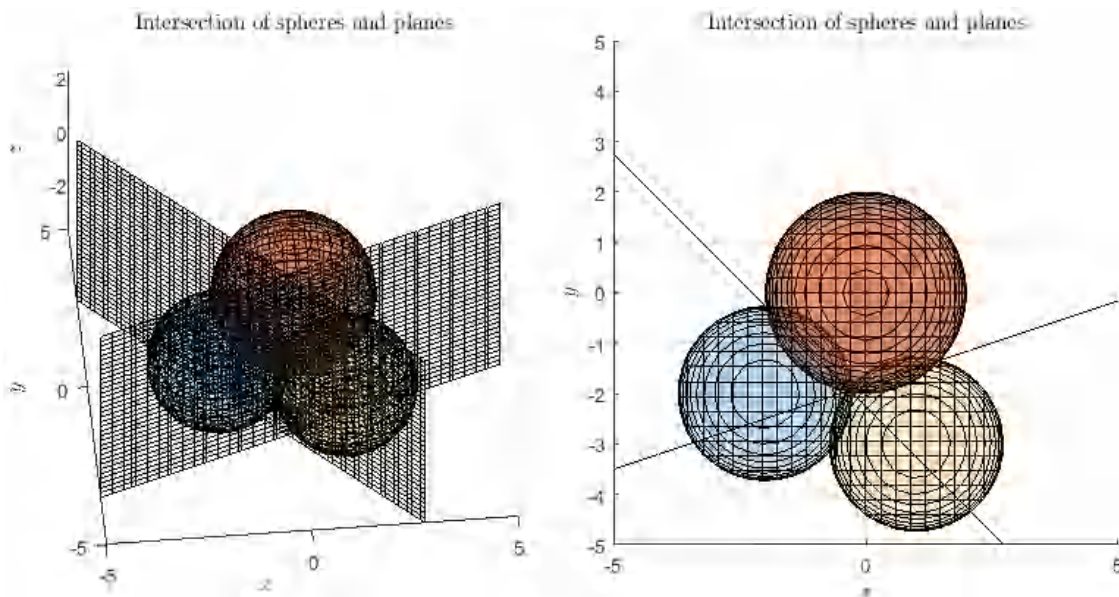


Рис. 2. Геометрическое представление пересечения сфер и плоскостей (трехмерное изображение и проекция на горизонтальную плоскость)

Таким образом, координаты фактического положения центра масс (центра симметрии) мобильной платформы неполноприводного параллельного тросового робота могут быть найдены при условии известных значений длин сегментов тросов (программно определяемых) и углов ориентации мобильной платформы (по показаниям гироскопа).

На основании вычисленного значения фактического положения мобильной платформы, которое будет тем сильнее отличаться от заданного значения, чем больше мобильная платформа будет удалена от центра симметрии рабочего пространства робота, становится возможным осуществлять корректировку положения рабочего инструмента робота. Одним из способов точной подстройки является перемещение рабочего инструмента робота с помощью платформы Стюарта, закрепленной в нижней части мобильной платформы тросового робота.

Полагается, что система автоматического управления обеспечивает точную подстройку рабочего инструмента робота, смонтированного на платформе Стюарта, в пределах указанных ниже отклонений от заданного положения. В качестве примера далее приводится конструкция, предназначенная для изготовления печатных образцов с использованием аддитивных технологий [18].

Конструкция используемой в модели платформы Стюарта показана на рис. 3.

Заметим, что мобильная платформа тросового робота, по существу, сама является платформой Стюарта. Однако присоединенная к мобильной платформе тросового робота платформа Стюарта имеет избыточное число степеней подвижности, что обеспечивает любое желаемое положение рабочего инструмента в пределах рабочего пространства робота, за исключением особых точек (при их наличии).

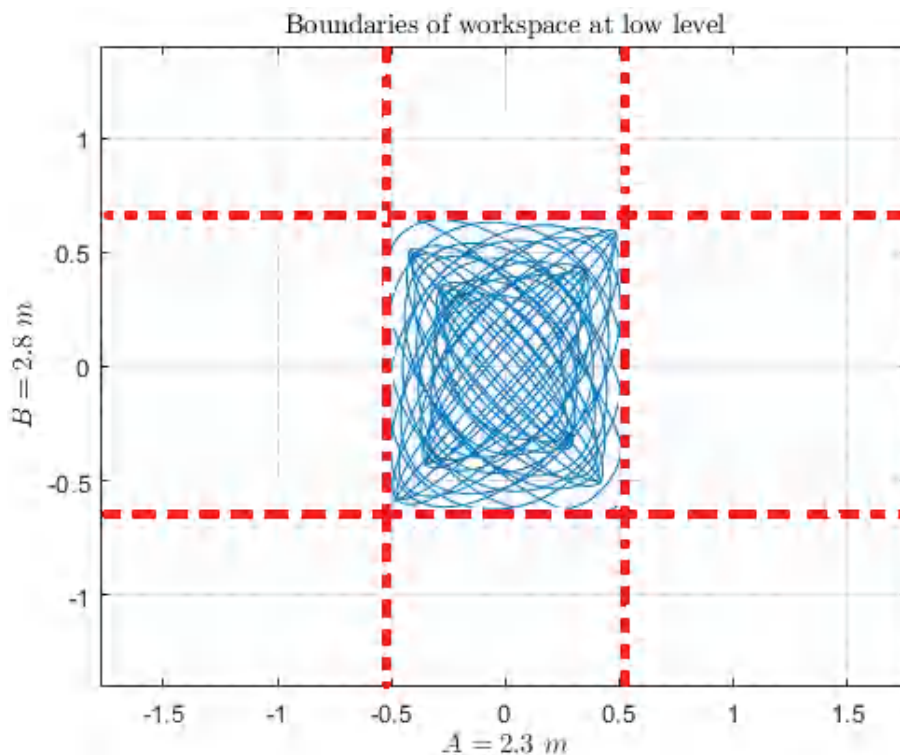


Рис. 3. Определение границ рабочего пространства робота в проекции на горизонтальную плоскость на нижнем уровне по критерию максимального отклонения центра масс мобильной платформы от заданного положения при условии стабильности системы

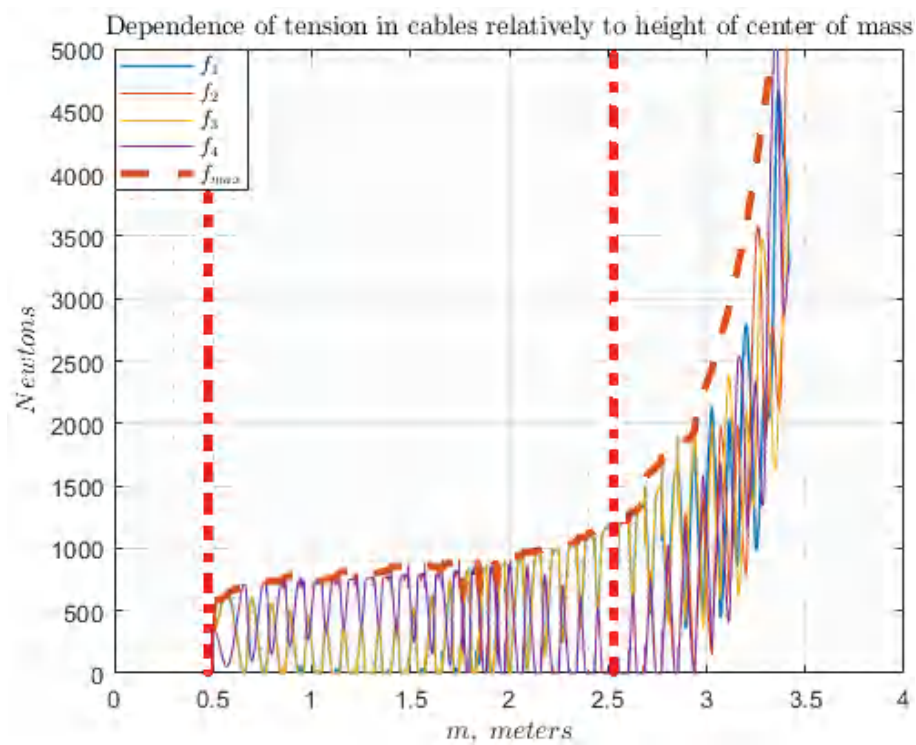


Рис. 4. Зависимость максимального натяжения тросов от координаты высоты заданного положения центра масс мобильной платформы четырехтросового пространственного параллельного робота

Численное моделирование

Численный эксперимент по определению области рабочего пространства неполноприводного параллельного тросового робота проводится следующим образом:

1) определяются границы рабочего пространства робота в проекции на горизонтальную плоскость на нижнем уровне по критерию максимального отклонения центра масс мобильной платформы от заданного положения при условии стабильности системы;

2) осуществляется постепенное увеличение высоты над нулевым уровнем программно заданной плоской траектории движения в рамках обозначенной границы до момента резкого увеличения максимальных значений сил натяжения тросов;

3) полученные границы считаются границами рабочего пространства робота в первом приближении;

4) задаются ограничения на максимально допустимые отклонения мобильной платформы робота по линейным и угловым координатам;

5) полученные границы считаются границами рабочего пространства робота во втором приближении;

6) с учетом эксплуатационных характеристик серийного образца платформы Стюарта выполняется оценка рабочего пространства робота в третьем приближении;

7) по результатам численного эксперимента делаются выводы с учетом заданной конфигурации гибридного параллельного тросового робота.

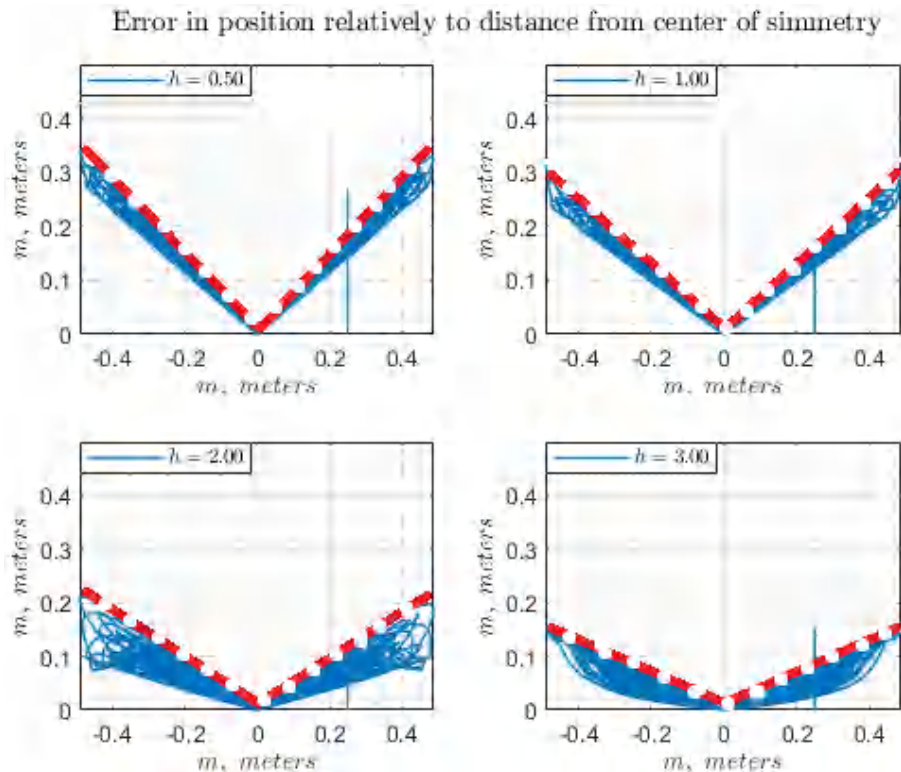


Рис. 5. Зависимость отклонения от заданного положения координат проекции центра масс мобильной платформы робота на горизонтальную плоскость при удалении от центра симметрии рабочего пространства четырехтросового параллельного робота

Численные значения параметров модели гибридного параллельного тросового робота определяются следующими величинами:

- длина ребра основания параллелепипеда несущей конструкции робота: $A = 2,300$ м;
- ширина ребра основания параллелепипеда несущей конструкции робота: $B = 2,800$ м;
- высота параллелепипеда несущей конструкции робота: $C = 4,000$ м;

- радиус цилиндра мобильной платформы робота: $r = 0,495$ м;
- высота цилиндра мобильной платформы робота: $h = 1,000$ м;
- масса мобильной платформы робота: $m = 130$ кг;
- скорость перемещения мобильной платформы робота: $v \leq 0,025$ м/с;
- допустимое отклонение рабочего инстру-

мента робота: $\Delta \leq 0,010$ м;

– перемещение платформы Стюарта: $s \leq 0,100$ м;

Результаты проведенного численного эксперимента представлены на рис. 4–6. Расчеты

произведены для робота с несущей конструкцией в форме параллелепипеда с размерами $2,3 \times 2,8 \times 4,0$ м; точки схода тросов с направляющих роликов соответствуют вершинам верхних углов параллелепипеда.

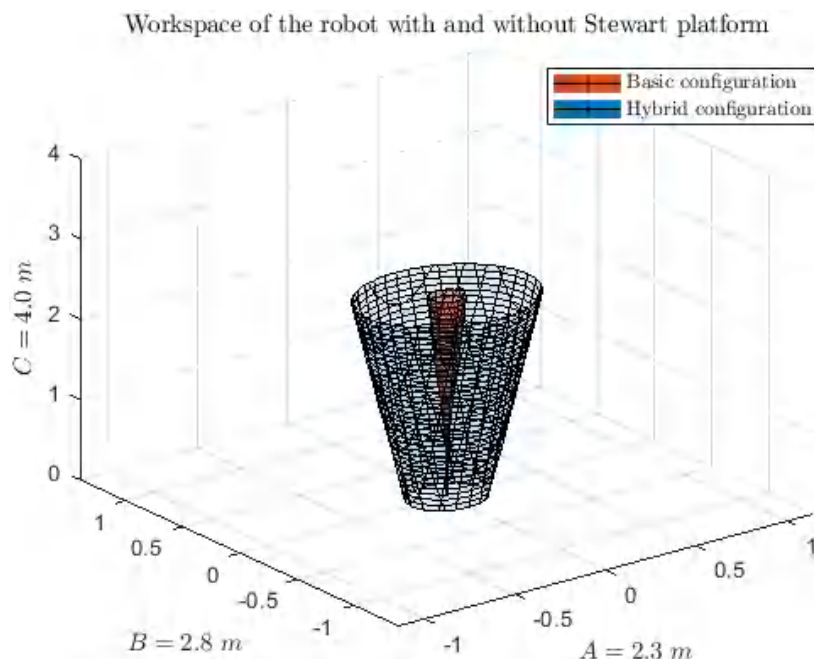


Рис. 6. Границы рабочего пространства с ограничениями по максимально допустимым отклонениям неполноприводного параллельного тросового робота в базовой конфигурации и с использованием платформы Стюарта

Выводы

В настоящем исследовании произведено моделирование области рабочего пространства гибридного неполноприводного параллельного тросового робота в исходной конфигурации и с использованием платформы Стюарта. Полученные в результате компьютерного моделирования границы можно считать оценочными в первом приближении, поскольку в используемой модели применялось примитивное автоматическое управление; также не учитывались динамические эффекты гибридного робота с использованием платформы Стюарта. По результатам моделирования можно сделать вывод, что добавление платформы Стюарта позволяет существенно увеличить область рабочего пространства робота, определяемую допустимыми отклонениями рабочего инструмента от заданного положения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Landsberger, S. E.* Design and construction of a cable-controlled, parallel link manipulator. – Massachusetts Institute of Technology, 1984.

2. *Albus, J. S.* Cable arrangement and lifting platform for stabilized load lifting. US Patent No. 4 883 184, Nov. 28, 1989.

3. Development of an ultrahigh speed robot FALCON using wire drive system / S. Kawamura, W. Choe, S. Tanaka, S. R. Pandian // Proceedings of 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1995. – Volume 1. – Pp. 215–220.

4. On design of a redundant wire-driven parallel robot WARP manipulator / K. Maeda, S. Tadokoro, T. Takamori, M. Hiller, R. Verhoeven // Proceedings 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1999. – Volume 1. – Pp. 895–900.

5. *Zi, B.* Design, Analysis and Control of Cable-Suspended Parallel Robots and Its Applications / B. Zi, S. Qian. – Springer, 2017.

6. *Pott, A.* Cable-Driven Parallel Robots: Theory and Application. – Springer, 2018.

7. On the Problem of Position and Orientation Errors of a Large-Sized Cable-Driven Parallel Robot / E. A. Marchuk, Y. V. Kalinin, A. V. Sidorova, A. V. Maloletov // Russian Journal of Nonlinear Dynamics. – 2022. – Vol. 18. – No. 5. – P. 755.

8. *Marchuk, E. A.* Error Compensation in Position and Orientation of Mobile Platform of Cable-Driven Robots via Tensile Forces Measurement / E. A. Marchuk, Ya. V. Kalinin, A. V. Maloletov // Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie. – 2022. – Vol. 23. – No. 10. – P. 515.

9. *Marchuk, E.* On Smooth Planar Curvilinear Motion of End-Effector of Cable-Driven Parallel Robot / E. Marchuk,

Ya. Kalinin, A. Maloletov // IFAC – PapersOnLine, 2022, 55(10). – Pp. 2475–2480.

10. McNeil, I. An Encyclopaedia of the history of technology. – Routledge, 1996.

11. Kim, P.W. Scientific Disciplines of Geojunggi (the Traditional Crane) in Korean Science, Technology and History Class // EURASIA Journal of Mathematics Science and Technology Education. – 2017. – No. 13(9). – Pp. 6147–6163.

12. Kalinin, Ya. V. Specificity of Including of Structural Nonlinearity in Model of Dynamics of Cable-Driven Robot / Ya. V. Kalinin, E. A. Marchuk // Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie. – 2021. – Vol. 22. – No. 10. – P. 547.

13. Светлицкий, В. А. Механика трубопроводов и шлангов. – М.: Машиностроение, 1982. – 280 с.

14. Янгольский, А. П. Гиперболические функции. – М.: Физматгиз, 1960. – 196 с.

15. Меркин, Д. Р. Введение в механику гибкой нити. – М: Наука, 1980. – 240 с.

16. Finite Element Modelling on the Mechanical Behaviour of Marine Bonded Composite Hose (MBCH) under Burst and Collapse / C. V. Amaechi, C. Chesterton, H. O. Butler, Z. Gu, Odijie, A. C. Wang F., X. Hou, J. Ye // J. Mar. Sci. Eng. – 2022. – No. 10. – P. 151.

17. Mersi, R. Design and Control of a Suspended Cable-Driven Parallel Robot with Four Cables / R. Mersi, S. Vali, M. S. Haghghi, G. Abbasnejad, M. T. Masouleh // Proceedings of the 6th RSI International Conference on Robotics and Mechatronics (ICRoM 2018) – Tehran, Iran, 2018.

18. Пат. № 2753324 С1 Российская Федерация, МПК E04B 1/16, B33Y 30/00. Строительный 3D-принтер / М. М. Галимов, А. С. Климчик, А. В. Малолетов [и др.]. – № 2020140696 ; заявл. 10.12.2020; опубл. 13.08.2021.

УДК 621.865.8

DOI 10.35211/1990-5297-2023-4-275-71-76

А. В. Нелюбова, В. В. Жога, И. П. Вершинина

РАСЧЕТ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАНИПУЛЯТОРА-ТРИПОДА С ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ СВЯЗЬЮ*

Волгоградский государственный технический университет

mqschen@yandex.ru

Рассматривается манипулятор-трипод с дополнительной связью, предназначенной для разгрузки линейных исполнительных звеньев от изгибающих нагрузок. Разработана методика решения обратной задачи кинематики манипулятора. Решена задача позиционирования. Решение этой задачи носит оптимизационный характер. Определены геометрические характеристики, влияющие на объем рабочей зоны.

Ключевые слова: манипулятор-трипод, кинематические характеристики, обратная задача кинематики.

A. V. Nelyubova, V. V. Zhoga, I. P. Vershinina

COMPUTATION OF KINEMATIC CHARACTERISTICS OF A MANIPULATOR-TRIPOD WITH ADDITIONAL KINEMATIC COUPLING

Volgograd State Technical University

A manipulator-tripod with an additional link is considered for unloading actuators from bending loads. A method for solving the inverse kinematics of manipulator has been developed. The problem of manipulator positioning has been solved. The solution of the problem of manipulator positioning is presented as a solution to the optimization problem. The geometric characteristics for finding the volume of the working area of the manipulator are determined.

Keywords: manipulator-tripod, kinematic characteristics, inverse kinematics.

Введение

В современных условиях развития роботизированного производства особую роль играют манипуляторы параллельно-последовательной структуры, комбинирующие в себе свойства как последовательной, так и параллельной кинематических схем. Преимуществом использования манипуляторов параллельно-последовательной структуры является сочетание достоинств как последовательной, так и параллель-

ной структуры, состоящих в большой рабочей зоне, повышенной жесткости и точности позиционирования рабочего органа.

Объект исследований

На рис. 1 представлена кинематическая схема манипулятора-трипода параллельно-последовательной структуры. Манипулятор содержит три линейных исполнительных звена (1, 2, 3), связанных с поворотным основанием в точках

© Нелюбова А. В., Жога В. В., Вершинина И. П., 2023.

* Исследование осуществлено за счет проекта, выполняемого магистрантами ВолгГТУ по программе развития ВолгГТУ «Приоритет 2030» № 25/480-22.

A, B, C с помощью двух подвижных шарниров. Другие концы исполнительных звеньев закреплены с помощью сферических шарниров на выходном звене 6 . Дополнительная геометрическая связь в виде полый трубы 5 воспринимает изгибающие моменты, обеспечивает жесткость

конструкции и точность позиционирования рабочего органа. Четвертый линейный привод 4 обеспечивает поворот треугольного основания вокруг горизонтальной оси, увеличивая рабочую зону манипулятора. Манипулятор имеет четыре степени подвижности [1].

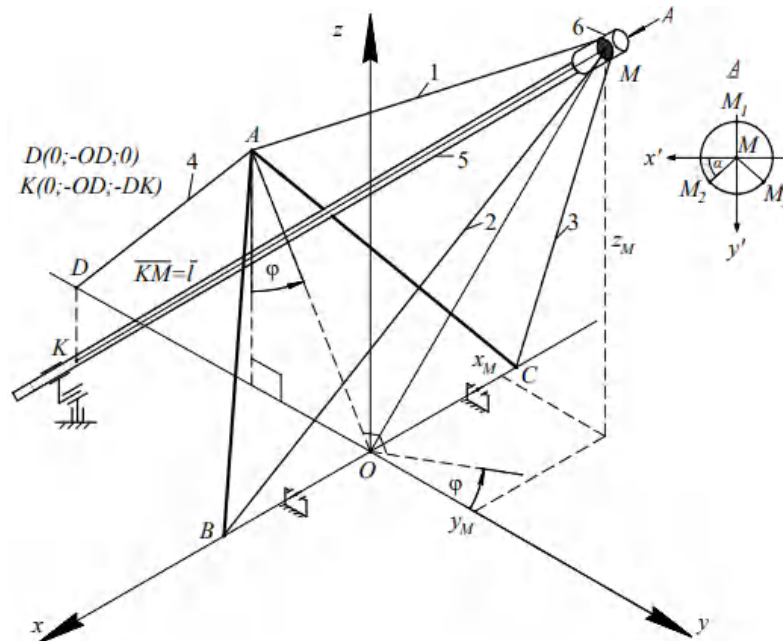


Рис. 1. Кинематическая схема манипулятора параллельно-последовательной структуры на основе трипода с дополнительной связью

Для определения пространственного положения исполнительных звеньев манипулятора вводятся системы координат – абсолютная $Oxyz$, связанная с неподвижным основанием, с корпусом каждого линейного исполнительного звена полый трубой 5 связаны подвижные системы координат $x_i y_i z_i$ ($i=1-5$) с началом в точке их крепления. Ориентация каждой подвижной системы координат $x_i y_i z_i$ ($i=1-5$) относительно абсолютной $Oxyz$ задается двумя углами: углом δ_i при повороте вокруг оси z_i , параллельной неподвижной оси Oz , и углом ψ_i при повороте вокруг оси x_i^* . Ориентация подвижной системы координат в пространстве не зависит от последовательности поворотов (рис. 2).

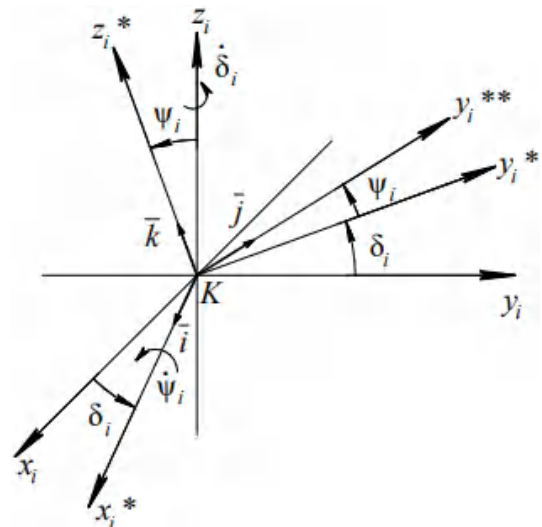


Рис. 2. К определению направляющих косинусов

Таблица косинусов имеет вид:

$$\begin{pmatrix} \alpha_{11i} = \cos \delta_i & \alpha_{12i} = \sin \delta_i & \alpha_{13i} = 0 \\ \alpha_{21i} = -\cos \psi_i \sin \delta_i & \alpha_{22i} = \cos \psi_i \cos \delta_i & \alpha_{23i} = \sin \psi_i \\ \alpha_{31i} = \sin \psi_i \sin \delta_i & \alpha_{32i} = -\sin \psi_i \cos \delta_i & \alpha_{33i} = \cos \psi_i \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Для четвертого звена $\delta_4 = 0$.

Положение точки M на выходном звене b определяется координатами x_M, y_M, z_M относительно неподвижной системы координат $Oxyz$. Обобщенными координатами манипулятора являются длины исполнительных звеньев $l_i(t)$, $i=1,2,3,4$. Зависимости между декартовыми координатами точек крепления исполнительных звеньев на выходном звене $M_1(x_{M_1}, y_{M_1}, z_{M_1}), M_2(x_{M_2}, y_{M_2}, z_{M_2}), M_3(x_{M_3}, y_{M_3}, z_{M_3})$ в абсолютной системе отсчета $Oxyz$ и длинами звеньев имеют вид (рис. 1):

$$\begin{aligned} l_1(t) &= \sqrt{x_{M_1}^2 + (y_{M_1} - y_A)^2 + (z_{M_1} - z_A)^2}, \\ l_2(t) &= \sqrt{(x_{M_2} - OB)^2 + y_{M_2}^2 + z_{M_2}^2}, \\ l_3(t) &= \sqrt{(x_{M_3} + OC)^2 + y_{M_3}^2 + z_{M_3}^2}, \\ l_4(t) &= \sqrt{(y_A - y_D)^2 + z_A^2}, \end{aligned} \quad (2)$$

где OA, OB, OC, OK, OD – геометрические параметры поворотного основания и точек его крепления; φ – угол поворота основания.

Так как координаты точки A являются однозначными функциями угла поворота основания φ

$$y_A = -OA \sin \varphi, \quad z_A = OA \cos \varphi, \quad (3)$$

то в качестве обобщенных координат манипулятора принимаем длины исполнительных звеньев $l_i(t)$, $i=1,2,3$ и угол поворота основания $\varphi(t)$.

Постановка задачи

В результате того, что число обобщенных координат манипулятора (четыре) больше числа декартовых координат (три) характерной точки выходного звена, маневренность манипулятора равна единице, и для решения задачи позиционирования рассматриваемой конструкции манипулятора необходимо сформулировать дополнительное условие [2]. Решение задачи приобретает оптимизационный характер. Обеспечение позиционирования манипулятора при выполнении технологических операций состоит в перемещении его из начального состояния, которое определяется координатами точки

$M_0(x_{M_0}, y_{M_0}, z_{M_0})$ в конечное положение $M_k(x_{M_k}, y_{M_k}, z_{M_k})$. То есть, при известной начальной конфигурации манипулятора, определяемой обобщенными координатами l_{i0} , $i=1-4$, необходимо найти конечную конфигурацию – значения обобщенных координат l_{ik} , $i=1-4$. Длины второго $l_2(t)$ и третьего $l_3(t)$ исполнительных звеньев зависят только от декартовых координат выходного звена, а длины первого $l_1(\varphi)$ и четвертого $l_4(\varphi)$ исполнительных звеньев зависят от угла поворота φ основания и могут принимать любые значения в пределах допустимого изменения своих геометрических параметров при фиксированном положении характерной точки M выходного звена.

Таким образом, для решения задачи позиционирования необходимо решить обратную задачу кинематики – найти аналитические зависимости обобщенных координат манипулятора от декартовых координат характерной точки выходного звена.

Решение обратной задачи кинематики

Формулы преобразования координат вектора в подвижной системе координат в координаты относительно неподвижной системы координат имеют вид [3]

$$\begin{aligned} x &= x_0 + \alpha_{11i} x_i^* + \alpha_{21i} y_i^* + \alpha_{31i} z_i^*, \\ y &= y_0 + \alpha_{12i} x_i^* + \alpha_{22i} y_i^* + \alpha_{32i} z_i^*, \\ z &= z_0 + \alpha_{13i} x_i^* + \alpha_{23i} y_i^* + \alpha_{33i} z_i^*, \end{aligned} \quad (4)$$

где x, y, z – координаты вектора в абсолютной системе координат; x_i^*, y_i^*, z_i^* – координаты вектора в подвижной системе координат; x_0, y_0, z_0 – координаты полюса подвижной системы координат; α_{11i} – направляющие косинусы подвижной системы координат относительно неподвижной.

Тогда проекции вектора $\overline{OM}_1, x_{M_1}^* = 0, y_{M_1}^* = -r, z_{M_1}^* = 0$ равны

$$\begin{aligned} x_{M_1} &= x_M + \alpha_{115} x_{M_1}^* + \alpha_{215} y_{M_1}^* + \alpha_{315} z_{M_1}^* = x_M + r \cos \psi_5 \sin \delta_5, \\ y_{M_1} &= y_M + \alpha_{125} x_{M_1}^* + \alpha_{225} y_{M_1}^* + \alpha_{325} z_{M_1}^* = y_M - r \cos \psi_5 \cos \delta_5, \\ z_{M_1} &= z_M + \alpha_{135} x_{M_1}^* + \alpha_{235} y_{M_1}^* + \alpha_{335} z_{M_1}^* = z_M - r \sin \delta_5. \end{aligned} \quad (5)$$

Подставляя в (2) выражения (3) и (5), получаем:

$$l_1^2(t) = x_M^2 + y_M^2 + z_M^2 + r^2 + OA^2 - 2y_M r \cos \psi_5 \cos \delta_5 - 2OA \sin \varphi (r \cos \psi_5 \cos \delta_5 - y_M) - 2z_M r \sin \psi_5 + 2OA \cos \varphi (r \sin \psi_5 - z_M). \quad (6)$$

Проекции вектора $\overline{OM_2}$, $x_{M_2}^* = r \cos \alpha$, $y_{M_2}^* = r \sin \alpha$, $z_{M_2}^* = 0$ равны:

$$\begin{aligned} x_{M_2} &= x_M + \alpha_{11} x_{M_2}^* + \alpha_{21} y_{M_2}^* + \alpha_{31} z_{M_2}^* = x_M + r \cos \delta_5 \cos \alpha - r \cos \psi_5 \sin \delta_5 \sin \alpha, \\ y_{M_2} &= y_M + \alpha_{12} x_{M_2}^* + \alpha_{22} y_{M_2}^* + \alpha_{32} z_{M_2}^* = y_M + r \sin \delta_5 \cos \alpha + r \cos \psi_5 \cos \delta_5 \sin \alpha, \\ z_{M_2} &= z_M + \alpha_{13} x_{M_2}^* + \alpha_{23} y_{M_2}^* + \alpha_{33} z_{M_2}^* = z_M + r \sin \psi_5 \sin \alpha. \end{aligned} \quad (7)$$

Подставляя в (1) выражение (6), получаем:

$$\begin{aligned} l_2^2 &= (x_M - OB)^2 + y_M^2 + z_M^2 + r^2 + \\ &+ 2r(x_M - OB)(\cos \delta_5 \cos \alpha - \cos \psi_5 \sin \delta_5 \sin \alpha) + \\ &+ 2ry_M(\sin \delta_5 \cos \alpha + \cos \psi_5 \cos \delta_5 \sin \alpha) + 2z_M r \sin \psi_5 \sin \alpha. \end{aligned} \quad (8)$$

Проекции вектора $\overline{OM_3}$, $x_{M_3}^* = -r \cos \alpha$, $y_{M_3}^* = r \sin \alpha$, $z_{M_3}^* = 0$ равны:

$$\begin{aligned} x_{M_3} &= x_M + \alpha_{11} x_{M_3}^* + \alpha_{21} y_{M_3}^* + \alpha_{31} z_{M_3}^* = x_M - r \cos \delta_5 \cos \alpha - r \cos \psi_5 \sin \delta_5 \sin \alpha, \\ y_{M_3} &= y_M + \alpha_{12} x_{M_3}^* + \alpha_{22} y_{M_3}^* + \alpha_{32} z_{M_3}^* = y_M - r \sin \delta_5 \cos \alpha + r \cos \psi_5 \cos \delta_5 \sin \alpha, \\ z_{M_3} &= z_M + \alpha_{13} x_{M_3}^* + \alpha_{23} y_{M_3}^* + \alpha_{33} z_{M_3}^* = z_M + r \sin \psi_5 \sin \alpha. \end{aligned} \quad (9)$$

Подставляя в (1) выражение (8), получаем:

$$\begin{aligned} l_3^2 &= (x_M + OC)^2 + y_M^2 + z_M^2 + r^2 - \\ &- 2r(x_M + OC)(\cos \delta_5 \cos \alpha + \cos \psi_5 \sin \delta_5 \sin \alpha) + \\ &+ 2ry_M(-\cos \alpha \sin \delta_5 + \cos \psi_5 \cos \delta_5 \sin \alpha) + 2z_M r \sin \psi_5 \sin \alpha. \end{aligned} \quad (10)$$

Выражения для углов ориентации звена KM через координаты точки M имеют вид:

$$\begin{aligned} \sin \delta_5 &= -\frac{x_M}{\sqrt{x_M^2 + (y_M + OD)^2}}; \\ \cos \delta_5 &= \frac{(y_M + OD)}{\sqrt{x_M^2 + (y_M + OD)^2}}; \\ \sin \psi_5 &= -\sqrt{\frac{x_M^2 + (y_M + OD)^2}{x_M^2 + (y_M + OD)^2 + (z_M + DK)^2}}; \\ \cos \psi_5 &= \frac{(z_M + DK)}{\sqrt{x_M^2 + (y_M + OD)^2 + (z_M + DK)^2}}. \end{aligned} \quad (11)$$

Подставляя (11) в (6), (8), (10), окончательно получаем выражения обобщенных координат манипулятора через декартовые координаты характерной точки выходного звена

$$\begin{aligned}
 l_1^2(t) = & x_M^2 + y_M^2 + z_M^2 + r^2 + OA^2 - \\
 & -2r \frac{(z_M + DK)y_M}{\sqrt{x_M^2 + (y_M + OD)^2 + (z_M + DK)^2}} \frac{(y_M + OD)}{\sqrt{x_M^2 + (y_M + OD)^2}} - \\
 & -2OA \left(r \frac{(z_M + DK)}{\sqrt{x_M^2 + (y_M + OD)^2 + (z_M + DK)^2}} \frac{(y_M + OD)}{\sqrt{x_M^2 + (y_M + OD)^2}} - y_M \right) \sin \varphi + \\
 & +2z_M r \sqrt{\frac{x_M^2 + (y_M + OD)^2}{x_M^2 + (y_M + OD)^2 + (z_M + DK)^2}} - \\
 & -2OA \left(r \sqrt{\frac{x_M^2 + (y_M + OD)^2}{x_M^2 + (y_M + OD)^2 + (z_M + DK)^2}} + z_M \right) \cos \varphi.
 \end{aligned} \tag{12}$$

$$\begin{aligned}
 l_2^2 = & (x_M - OB)^2 + y_M^2 + z_M^2 + r^2 - 2z_M r \sqrt{\frac{x_M^2 + (y_M + OD)^2}{x_M^2 + (y_M + OD)^2 + (z_M + DK)^2}} \sin \alpha + \\
 & +2r(x_M - OB) \left(\frac{(y_M + OD)}{\sqrt{x_M^2 + (y_M + OD)^2}} \cos \alpha + \right. \\
 & \left. + \frac{(z_M + DK)}{\sqrt{x_M^2 + (y_M + OD)^2 + (z_M + DK)^2}} \frac{x_M}{\sqrt{x_M^2 + (y_M + OD)^2}} \sin \alpha \right) +
 \end{aligned} \tag{13}$$

$$\begin{aligned}
 & +2ry_M \left(-\cos \alpha \frac{x_M}{\sqrt{x_M^2 + (y_M + OD)^2}} + \right. \\
 & \left. + \frac{(z_M + DK)}{\sqrt{x_M^2 + (y_M + OD)^2 + (z_M + DK)^2}} \frac{(y_M + OD)}{\sqrt{x_M^2 + (y_M + OD)^2}} \sin \alpha \right). \\
 l_3^2 = & (x_M + OC)^2 + y_M^2 + z_M^2 + r^2 - 2z_M r \sqrt{\frac{x_M^2 + (y_M + OD)^2}{x_M^2 + (y_M + OD)^2 + (z_M + DK)^2}} \sin \alpha - \\
 & -2r(x_M + OC) \left(\frac{(y_M + OD)}{\sqrt{x_M^2 + (y_M + OD)^2}} \cos \alpha - \right. \\
 & \left. - \frac{(z_M + DK)}{\sqrt{x_M^2 + (y_M + OD)^2 + (z_M + DK)^2}} \frac{x_M}{\sqrt{x_M^2 + (y_M + OD)^2}} \sin \alpha \right) + \\
 & +2ry_M \left(\frac{x_M}{\sqrt{x_M^2 + (y_M + OD)^2}} \cos \alpha + \right. \\
 & \left. + \frac{(z_M + DK)}{\sqrt{x_M^2 + (y_M + OD)^2 + (z_M + DK)^2}} \frac{(y_M + OD)}{\sqrt{x_M^2 + (y_M + OD)^2}} \sin \alpha \right).
 \end{aligned} \tag{14}$$

Для четвертого исполнительного звена из (1) с учетом (2) получаем:

$$l_4^2(t) = (OD - OA \sin \varphi)^2 + OA^2 \cos^2 \varphi. \tag{15}$$

Позиционирование манипулятора

Условие для определения конфигурации манипулятора при заданных координатах характерной точки выходного звена можно получить, минимизируя функцию [4]

$$\Phi(\varphi) = C_1 [l_{1k}(\varphi) - l_{10}]^2 + C_4 [l_{4k}(\varphi) - l_{40}]^2 \tag{16}$$

с ограничениями типа неравенств

$$\varphi_{\min} \leq \varphi^* \leq \varphi_{\max}. \tag{17}$$

В выражении (17) C_1, C_4 – весовые коэффициенты; $\varphi_{\min}, \varphi_{\max}$ – минимальное и максимальное допустимые значения угла поворота основания манипулятора-трипода; φ^* – оптимальное значение угла поворота.

Значения весовых коэффициентов C_1, C_4 следует выбирать тем больше, чем больше нагрузки на приводы 1 и 4. Для манипулятора

функция (17) имеет смысл минимума изменения длин исполнительных звеньев при изменении декартовых координат характерной точки выходного звена. Выбор квадратичного критерия оправдан простотой нахождения оптимальных значений. Условия (17) накладывают ограничения на максимальные и минимальные значения длин исполнительных звеньев l_1, l_4 .

Целевая функция Лагранжа имеет вид [5]:

$$\Phi^* = C_1(l_{1k} - l_{10})^2 + C_4(l_{4k} - l_{40})^2 + \lambda_1(u_1^2 + \varphi^* - \varphi_{\max}) + \lambda_2(u_2^2 + \varphi_{\min} - \varphi^*), \quad (18)$$

где u_1^2, u_2^2 , – вспомогательные переменные; λ_1, λ_2 – множители Лагранжа.

Необходимые условия минимума функции (18) записываются в форме

$$\frac{\partial \Phi^*}{\partial \varphi} = C_1 \frac{\partial (l_{1k} - l_{10})^2}{\partial \varphi} + C_4 \frac{\partial (l_{4k} - l_{40})^2}{\partial \varphi} + \lambda_1 - \lambda_2 = 0, \quad (19)$$

$$\lambda_1 = 0 \text{ при } \varphi^* < \varphi_{\max}; \lambda_2 = 0 \text{ при } \varphi^* > \varphi_{\min};$$

$$\lambda_1 > 0 \text{ при } \varphi^* = \varphi_{\max}; \lambda_2 > 0 \text{ при } \varphi^* = \varphi_{\min}.$$

Так как функция Лагранжа (18) выпуклая, а множители $\lambda_1 \geq 0, \lambda_2 \geq 0$, то необходимые условия (19) являются достаточными.

Пример реализации предложенного метода позиционирования

Задача позиционирования манипулятора решается следующим образом: для заданной точки выходного звена M_0 с координатами $x_{M_0} = -200$ мм; $y_{M_0} = 400$ мм; $z_{M_0} = -100$ мм и исходном угле поворотного основания $\varphi_0 = 0,3$ рад (17°) известна начальная конфигурация манипулятора, которой соответствуют значения обобщенных координат $l_{10} = 719$ мм; $l_{20} = 565,8$ мм; $l_{30} = 535$ мм; $l_{40} = 554,5$ мм. Задается координатами конечной точки M_k выходного звена манипулятора $x_{M_k} = 400$ мм; $y_{M_k} = 700$ мм; $z_{M_k} = 300$ мм. Из выражений (13) и (14) однозначно определяются конечные положения длин звеньев $l_{2k} = 786,1$ мм и $l_{4k} = 786,1$ мм. Затем из условия минимума квадратичной функции (19) с учетом ограничений определяется угол поворотного основания $\varphi_k = 0,015$ рад ($0,857^\circ$). Далее находим длины

исполнительных звеньев $l_{1k} = 808,6$ мм; $l_{4k} = 651,3$ мм для конечной конфигурации манипулятора. Для решения задачи позиционирования использовался программный пакет Mathcad с целью определения оптимального угла поворотного основания φ_k из условия минимума квадратичной функции (19) и ограничений ($-30^\circ \leq \varphi_k \leq 30^\circ$), а затем и обобщенные координаты манипулятора, соответствующие координатам конечной точки выходного звена.

Заключение

Рассматриваемая схема манипулятора-трипода с дополнительным звеном позволяет обеспечить необходимые параметры манипулятивности и оптимальную конфигурацию манипулятора при переводе его из начального положения в заданное конечное. Разработана методика решения обратной задачи кинематики манипулятора. Конструкция манипулятора более жесткая и позволяет разгрузить линейные приводы от изгибающих моментов. Для решения траекторной задачи с требуемыми параметрами мобильности и приемистости необходимо разработать алгоритмы определения законов изменения обобщенных координат, обеспечивающих заданное программное перемещение выходного звена.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Нелюбова, А. В. Технологический модуль на основе манипулятора параллельно-последовательной структуры / А. В. Нелюбова, В. В. Жога, Н. Г. Шаронов // XXXIV Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов по современным проблемам машиноведения : Сборник трудов конференции. Москва, 07–09 ноября 2022 года. – М. : Институт машиноведения им. А. А. Благонравова Российской академии наук, 2022. – С. 202–208.
2. Коловский, М. З. Основы динамики промышленных роботов / М. З. Коловский, А. В. Слоущ. – М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. – 240 с. (Науч. основы робототехники).
3. Лурье, А. И. Аналитическая механика / А. И. Лурье. – М. : Физматгиз, 1961. – 824 с.
4. Задача позиционирования манипулятора параллельно-последовательной структуры с управляемым захватным устройством / В. В. Жога, В. В. Дяшкин-Титов, И. А. Несмиянов, Н. С. Воробьева // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2016. – Т. 17. – № 8. – С. 525–530.
5. Банди, Б. Методы оптимизации : пер. с англ. / Б. Банди. – М. : Радио и связь, 1988. – 128 с.

УДК 634.1-13

DOI 10.35211/1990-5297-2023-4-275-77-82

*И. А. Несмиянов, Н. С. Воробьева, А. В. Дяшкин, В. В. Дяшкин-Титов***ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНОГО ИСПОЛНЕНИЯ
РОБОТИЗИРОВАННОГО УСТРОЙСТВА
ДЛЯ ПОБЕЛКИ СТВОЛОВ ДЕРЕВЬЕВ****Волгоградский государственный аграрный университет**

vgsxa@mail.ru

В статье представлен технологический процесс побелки стволов деревьев с использованием роботизированного мобильного самоходного шасси с системой ГЛОНАСС преимущественно для плодово-фруктовых деревьев в садах с большой площадью. Разработана конструкция роботизированного устройства и описан принцип ее действия, спроектирована система управления.

Ключевые слова: технологический процесс, побелка, роботизированное устройство, ГЛОНАСС, автоматизация.

*I. A. Nesmiyanov, N. S. Vorob'eva, A. V. Dyashkin, V. V. Dyashkin-Titov***JUSTIFICATION OF THE DESIGN OF A ROBOTIC DEVICE
FOR WHITEWASHING TREE TRUNKS****Volgograd State Agrarian University**

The article presents the technological process of whitewashing tree trunks using a robotic mobile self-propelled chassis with a GLONASS system mainly for fruit and fruit trees in gardens with a large area. The design of the robotic device is developed and the principle of this operation is described, the control system is designed.

Keywords: technological process, whitewashing, robotic device, GLONASS, automation.

Введение

Правильный уход за плодовыми культурами – это залог хорошего будущего урожая. Одна из важных обязательных процедур при уходе за плодово-фруктовыми деревьями – побелка деревьев, которая должна проводиться два раза в год, ранней весной и перед заморозками поздней осенью. Основное преимущество осенней обработки стволов деревьев заключается в том, что данная процедура помогает защитить кору плодовых и декоративных культур от растрескивания в сильные морозы. В это время к холодам готовится все живое в природе (насекомые в том числе). Они ищут надежное укрытие, где смогли бы благополучно впасть в спячку и продержаться до первого тепла. Лучше всего для этого подходит место под корой дерева; попасть туда можно, заполняя в трещины. Побелка осенью зацементирует слабые места коры и не позволит вредителям найти себе уютное место зимовки.

Качественно проведенная побелка деревьев весной является профилактической мерой, направленной на уничтожение болезнетворных микроорганизмов, которым все-таки удалось перезимовать в верхнем слое почвы. Кроме этого, обработка известью скелетных ветвей предотвращает возникновение ожогов. Весной

солнце становится активным; несложная процедура позволяет защитить кору от перегрева, пока еще на кроне нет листвы. Поэтому опытные садоводы всегда белят деревья дважды в год [1].

На малых садовых участках обычно садоводы используют для побелки мочалки, которыми не очень удобно работать. Также применяют малярную кисть с синтетическим ворсом и макловицу (последняя позволяет охватить одним движением руки большую площадь); ею легко работать с корой, имеющей гладкую структуру, и когда стволы деревьев покрыты глубокими трещинами. Для больших садов с высокими деревьями используют краскопульты, ими быстрее и менее трудоемко работать. Применение современных средств на основе автоматизированных и роботизированных процессов позволяет многократно облегчить процесс побелки стволов деревьев, особенно в садах на территориях с большими площадями. В последние годы использование автоматизированных и роботизированных средств является приоритетным и актуальным направлением в садоводстве. Снижение доли ручного труда, сокращение времени на выполнение технологического процесса – одна из главных задач автоматизации и роботизации [3].

Технологический процесс

В связи с актуальностью проблемы автоматизированной побелки деревьев разработан технологический процесс побелки стволов деревьев с использованием роботизированного устройства, который осуществляется по следующим этапам (рис. 1):

1. В бортовой компьютер вводится электронная карта – задание на проведение технологического процесса. В карте указываются границы, площадь насаждений, длина гона, количество проходов по полю, схема обработки поля – траектория движения роботизированного устройства с учетом поворотов и заходов на следующий гон, координаты реперной точки начала и конца обработки участка, координаты точек разворота на другой гон, координаты места заправки рабочим раствором, рабочая скорость движения, ширина междурядья, расстояние между деревьями в рядке, пределы норм внесения рабочего раствора побелки.

2. Роботизированное устройство перемещают в координаты реперной точки начала обработки участка на первый ряд. Наблюдение за пространством осуществляется с помощью лазерного оптического дальномера.

3. Роботизированное устройство перемещается к первому дереву и останавливается, как только ствол дерева окажется по центру оси окружности ведомого колеса системы распыления (рис. 1, а).

4. Одновременно включаются система распыления раствора побелки и электропривод вращения ведомого колеса системы распыления. После того как ведомое колесо сделает оборот на 180 градусов, обе системы отключаются (рис. 1, б).

5. Роботизированное устройство перемещается ко второму дереву в рядке. Во время перемещения включается электропривод ведомого колеса системы распыления в обратную сторону вращения, и ведомое колесо возвращается в первоначальное положение (рис. 1, в).

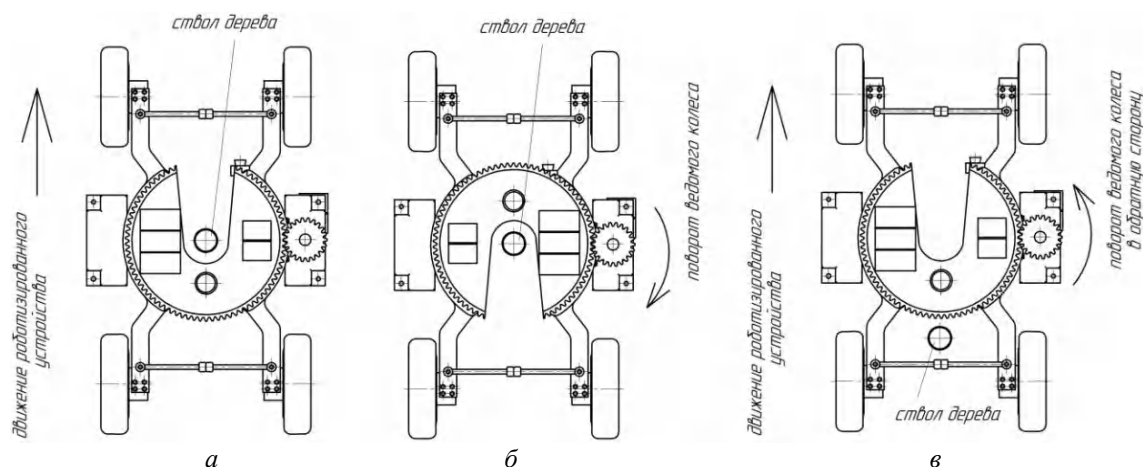


Рис. 1. Технологический процесс побелки стволов деревьев с использованием роботизированного устройства

На основании предложенного технологического процесса авторами статьи было разработано оригинальное техническое решение. Роботизированное устройство (рис. 2, 3) для побелки стволов деревьев содержит самодвижущееся четырехколесное шасси [4, 5], систему автономного электропитания, систему управления и навигации, систему технического зрения и систему распыления.

Самодвижущееся четырехколесное шасси выполнено в виде горизонтальной прямоугольной рамы 1 с двумя передними направляющими колесами 2, двумя задними ведущими коле-

сами 3 с приводными электромоторами 4, установленными на раме.

Система автономного электропитания включает установленный с двух сторон на раме блок бортовых аккумуляторных батарей 5. Система автономного питания комплексирована с системой управления и навигации.

Система управления и навигации включает: модуль программного управления работой бортового оборудования и программного движения робота по заданной траектории, содержащий бортовой компьютер 6 и связанный с ним блок управления 7 электроприводами шасси; модуль

интегрированной навигационной системы для определения координат и направления движения, состоящий из закрепленного на раме блока инерциальной навигационной системы 8 в виде цифровых инерциальных датчиков (гироскопов, акселерометров), объединенного с блоком спутниковой навигационной системы в виде приемника ГЛОНАСС/GPS 9.

Система технического зрения включает трехмерный сканирующий лазерный оптический дальномер 10 в виде лазерного передатчика и электрооптического приемника для пространственной ориентации робота, комплексированный с модулем интегрированной навигационной системы.

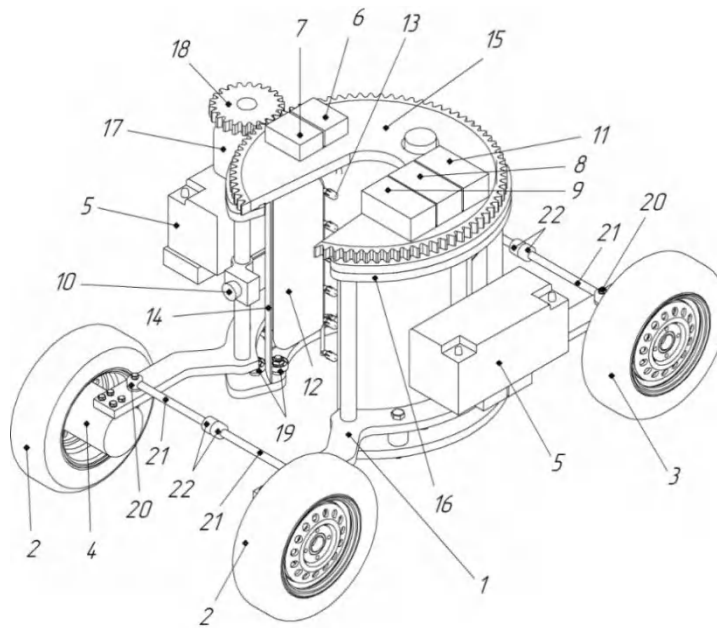


Рис. 2. Общий вид роботизированного устройства

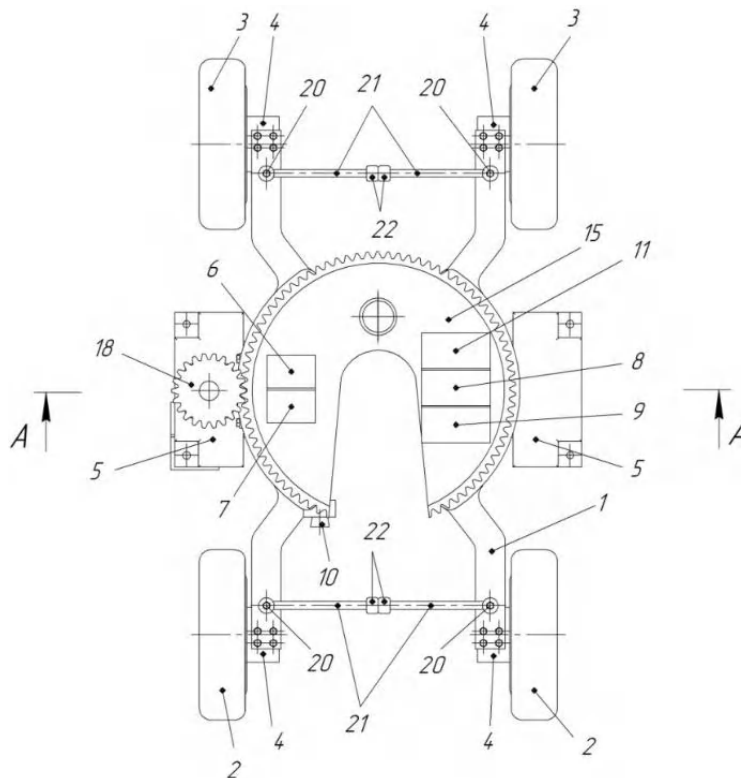


Рис. 3. Вид сверху

Система распыления (рис. 4) включает: установленные на раме блок 11 автоматического управления подачей, расходом и распределением рабочей жидкости, дозирующего и распределяющего гидравлического оборудования и насосный агрегат (не показано); бак 12 и две ramпы распыления с форсунками 13. Бак имеет форму, выполненную по кругу усеченной окружности. С внутренней стороны на боковой поверхности бака вертикально крепятся две ramпы распыления с форсунками, расположенные симметрично относительно оси бака.

На раме с наружной стороны вокруг бака устанавливается защитный экран 14, который

вместе с баком жестко крепится снизу к ведомому колесу 15. Ведомое колесо опирается на подшипник скольжения 16 и приводится в движение с помощью электропривода 17 с ведущей шестерней 18. На раме сверху на нижней части с двух сторон по контуру защитного экрана крепятся подшипники качения 19, обеспечивающие свободное перемещение защитного экрана между ними.

Для обхода препятствия (ствола) спереди и сзади рамы шарнирными узлами вращения 20 крепятся тяги 21 с магнитными датчиками 22, которые располагаются симметрично относительно друг друга на одной оси.

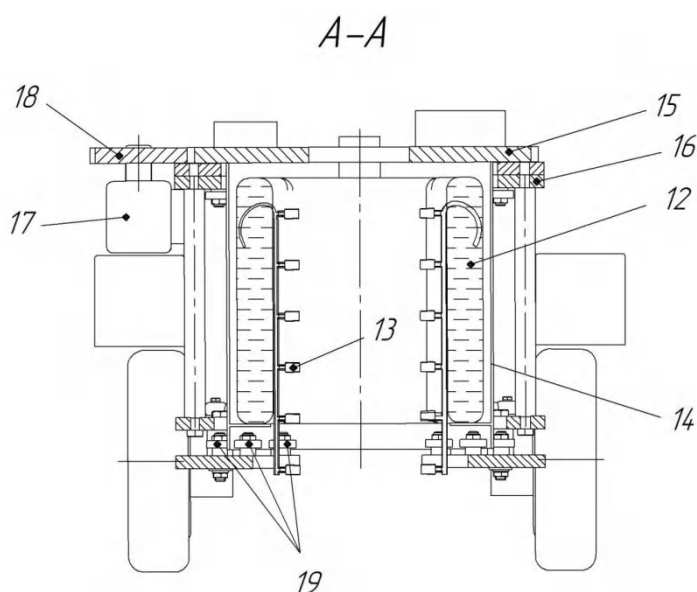


Рис. 4. Система распыления (в сечении)

Принцип действия роботизированного устройства для побелки стволов деревьев осуществляется следующим образом. Перед началом работы бортовой компьютер получает задание на выполнение технологического процесса, в котором прописываются параметры обрабатываемого участка – длина гона, ширина междурядья, схема обработки участка, норма расхода и распределение рабочей жидкости. В бак заливается готовый перемешанный раствор побелки. Включается в работу система автономного электропитания от блока бортовых аккумуляторных батарей; электропитание подается к системе управления и навигации, системе технического зрения, системе распыления. Включается система управления и навигации, система технического зрения. В соответствии с заданием технологического процесса от получаемых GPS/ГЛОНАСС приемника определя-

ются начальные координаты, и по сигналу от компьютера через блок управления электроприводом шасси включаются приводные электромоторы. Роботизированное устройство начинает движение и перемещается на начало ряда деревьев обрабатываемого участка. Система технического зрения посредством сканирующего лазерного оптического дальномера осуществляет наблюдение за пространством и обнаруживает стволы деревьев. Роботизированное устройство движется к первому дереву до тех пор, пока ствол не окажется рядом с тягами спереди рамы, и по сигналу компьютера магнитные датчики отключаются. При дальнейшем движении роботизированного устройства ствол, упираясь в тяги, поворачивает их относительно шарнирных узлов вращения, обходя вокруг себя. После того как ствол окажется за тягами, магнитные датчики включаются и тяги

перемещаются в первоначальное положение, замыкая спереди раму. Роботизированное устройство продолжает движение, пока ствол не окажется в прорези центра окружности ведомого колеса и останавливается. По сигналу компьютера включается электропривод, и ведущая шестерня, находясь в контакте с ведомым колесом, начинает его вращать. Одновременно с электроприводом включается система распыления. Посредством блока автоматического управления и дозирующего, распределяющего гидравлического оборудования с насосным агрегатом (не показано), раствор побелки из бака подается через две рампы распыления с форсунками на ствол дерева. Ведомое колесо, опираясь на подшипник скольжения, вращает вместе с собой бак и защитный экран, который свободно перемещается между подшипниками качения. Как только ведомое колесо сделает

поворот на 180 градусов, электропривод и система распыления выключаются. Роботизированное устройство продолжает движение; как только ствол выйдет из прорези окружности ведомого колеса, включается электропривод в обратную сторону, и ведомое колесо возвращается в исходное положение. Далее ствол проходит через тяги в задней части рамы аналогично, как и в передней части рамы. Обработка побелкой следующих стволов деревьев выполняется по заданной схеме обработки поля по такому же циклу.

Система управления

Для предлагаемой конструкции роботизированного устройства побелки стволов деревьев спроектирована система управления [2, 6], функциональная схема которой представлена на рис. 5.

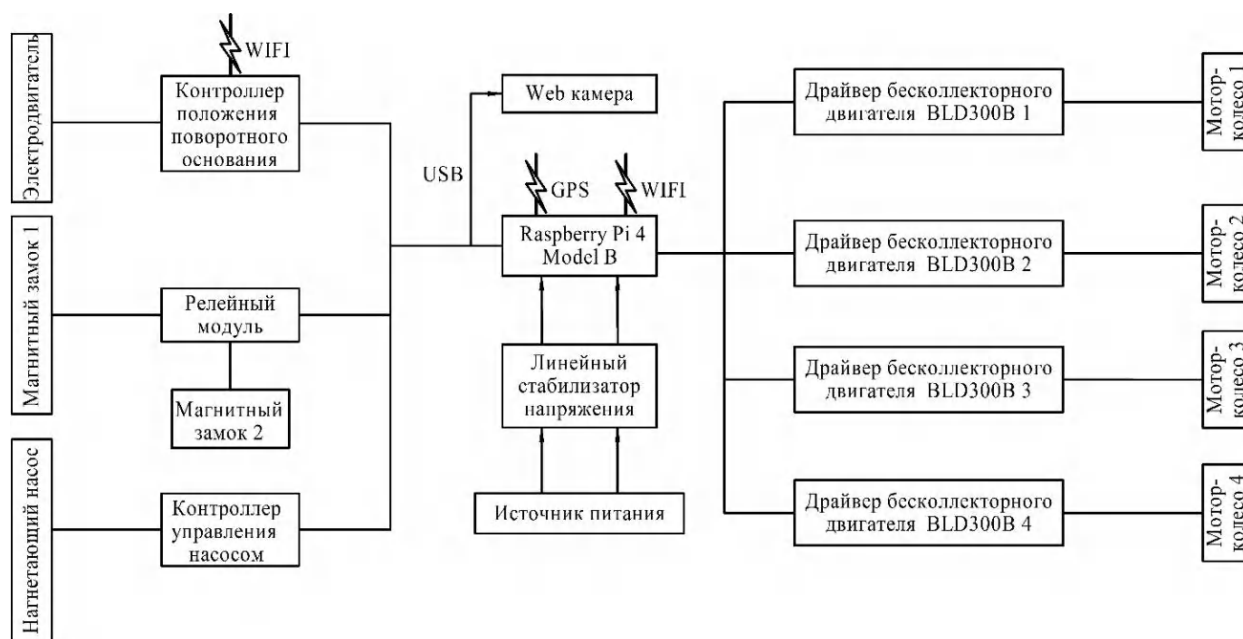


Рис. 5. Функциональная схема системы управления роботизированным устройством для побелки стволов деревьев

В основе системы лежит одноплатный микрокомпьютер Raspberry Pi 4 Model B на базе 4-ядерного 64-битного процессора Cortex-A72 (ARM v8) с частотой 1,5 ГГц; также микрокомпьютер оснащен 8 Gb встроенной оперативной памятью. По интерфейсу USB к Raspberry Pi 4 подключена web-камера, с помощью которой осуществляется корректировка движения робота по рядку. Для навигации по садам используется модуль GPS. Передвижение по садам осуществляется за счет четырех мотор-колес, для управ-

ления которыми используются четыре драйвера бесколлекторного двигателя BLD300B. Управление двигателем поворотного основания и нагнетающим насосом осуществляется контроллерами, которые подключаются к микрокомпьютеру посредством шины i2c. Жесткость конструкции достигается с помощью двух магнитных замков, которые поочередно открываются при прохождении ствола дерева; для управления ими предусмотрен релейный модуль, подключенный к цифровым выводам Raspberry Pi.

Заключение

Таким образом, роботизированное устройство выполняет обработку ствола дерева побелкой по кругу в вертикальной плоскости в автоматизированном режиме, при этом повышается производительность выполнения технологического процесса побелки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 8 главных правил ухода за плодовыми деревьями осенью [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://www.botanichka.ru/article/8-glavnyih-pravil-uhoda-za-plodovymi-derevyami-osenu/?ysclid=lahk0lxhc521676507>, свободный (дата обращения: 19.10.2022).

2. Многопроцессорная система управления манипулятором параллельно-последовательной структуры / Н. С. Воробьева, В. В. Жога, И. А. Несмиянов, В. В. Дяшкин-Титов,

В. Н. Скакунов // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 4(263) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2022. – С. 12–19.

3. Особенности применения роботизированных платформ в сельском хозяйстве / А. Б. Черненко, Н. С. Черников, Н. А. Багинский, М. И. Сысоев // Проблемы современной науки и образования. – 2020. – № 8 (153). – С. 18–23.

4. Пат. 2703092 Российская Федерация, В25J 5/00. Робот-пропольщик / Н. С. Воробьева, А. В. Дяшкин, А. Г. Иванов, И. А. Несмиянов, В. В. Жога, В. В. Дяшкин-Титов ; заявитель Волгоградский ГАУ. – № 2019102103 ; заявл. 25.01.19 ; опубл. 15.10.19.

5. Пат. 2703775 Российская Федерация, В25J 5/00. Робот-пропольщик / Н. С. Воробьева, А. В. Дяшкин, А. Г. Иванов, И. А. Несмиянов, В. В. Жога, В. В. Дяшкин-Титов ; заявитель Волгоградский ГАУ. – № 2019102105 ; заявл. 25.01.19 ; опубл. 22.10.19.

6. Интеллектуальные роботы : Учебное пособие для вузов / И. А. Каляев [и др.] ; под общ. ред. Е. И. Юревича. – М. : Машиностроение, 2007. – 360 с.

УДК 62-522.2

DOI 10.35211/1990-5297-2023-4-275-82-88

А. Ф. Рогачев, Е. В. Мелихова, Д. В. Зеляковский

ФИТОТРОННЫЙ КОМПЛЕКС НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ ИНТЕНСИВНОГО ВЫРАЩИВАНИЯ РАСТЕНИЙ

Волгоградский государственный аграрный университет

rafr@mail.ru

Робототехнические системы в аграрном производстве применяются для минимизации энергозатрат и снижения антропогенного воздействия. Разработанная конструктивно-технологическая схема фитотрона обеспечивает интенсификацию технологического процесса за счет нейросетевого микропроцессорного управления подсистемами, включая компьютерное зрение.

Ключевые слова: фитотрон, глубокие нейронные сети, задача классификации.

A. F. Rogachev, E. V. Melikhova, D. V. Zelyakovsky

PHYTOTRONIC COMPLEX BASED ON A VISION SYSTEM FOR INTENSIVE PLANT CULTIVATION

Volgograd State Agrarian University

Robotic systems in agricultural production are used to minimize energy consumption and reduce anthropogenic impact. The developed design and technological scheme of the phytotron provides intensification of the technological process due to neural network microprocessor control of subsystems, including computer vision.

Keywords: phytotron, deep neural networks, classification problem.

Введение

Анализ мировых тенденций технического прогресса в аграрном производстве показывает, что для минимизации затрат энергетических и материальных ресурсов, а также снижения антропогенного воздействия на окружающую среду при эксплуатации средств механизации сельскохозяйственного производства необходимы новые технические решения на основе цифровых технологий, робототехнических систем и искусственного интеллекта (ИИ). Робототехнические системы могут быть эффективно

использованы для мониторинга развития биологических объектов и контроля выполнения агротехнических мероприятий.

Федеральной научно-технической программой развития сельского хозяйства на 2017–2025 годы [1] предусмотрено ускоренное развитие средств интенсификации применения новых высокопроизводительных средств механизации, в том числе робототехнических. Традиционные методы ведения сельского хозяйства меняются на интеллектуальные технологии, повышающие эффективность агропроизводства [2]. Основные

направления использования робототехнических средств в растениеводстве могут обеспечивать основную обработку почвы, сев, внесение удобрений, уборку и другие технологические операции; в животноводстве автоматизацию таких трудоемких операций, как доение, уборку навоза, раздачу кормов [3, 4, 9, 11]. В зарубежном аграрном производстве широко используются робототехнические системы на основе интеллектуального управления [12–15].

Важным направлением интенсификации растениеводства, особенно в засушливых почвенно-климатических условиях, является выращивание растений в защищенном грунте, в том числе с применением интенсивных технологий [6]. Известен стенд для моделирования процессов выращивания корнеплодов на капельном орошении, включающий расположенный на станине лоток для пористой среды, боковые стенки которого выполнены из прозрачного материала. Для орошения используется система подачи воды, включающая бак с управляемым электроприводным насосом [16]. Вегетационный лоток заполнен почвогрунтом с растениями и расположенными на его поверхности капельницами. Прозрачные стенки лотка снабжены армирующими элементами, выполненными в виде металлического банджа с квадратными ячейками, откалиброванными в виде координатной сетки, при этом дно лотка выполнено из пористого материала (например, керамики). Стенд также содержит осветительный элемент на телескопической стойке.

Техническими проблемами применения таких устройств остаются ограниченность степени адаптивности и управляемости процессов выращивания растений, что может быть реализовано в фитотронах, использующих компьютерное зрение и управление на основе методов искусственного интеллекта.

Методы и материалы

Основными методологическими подходами к совершенствованию робототехнических средств аграрного производства являются системный анализ, структурно-параметрический синтез, методы технического зрения и нейросетевые средства интеллектуального распознавания образов [8, 10, 14]. При этом системы технического зрения непосредственно интегрируются с глубокими нейронными сетями, архитектура и гиперпараметры которых требуют оптимизации на основе программных средств и генетических алгоритмов. Глубокая ИНС для

системы компьютерного зрения разрабатывалась с использованием среды TerraAI, созданной в Университете искусственного интеллекта, обеспечивающей быстрое прототипирование нейросети на языке Python в среде Google Colaboratory.

В качестве аналога разрабатываемой системы был принят модульный энергосберегающий фитотрон, содержащий светодиодные облучатели с светодиодами красного и синего цвета питанием 12...24 В. Фитотрон разделен перегородками на три независимых друг от друга камеры с дверцами, в каждой из которых установлены три светодиодных облучателя; при этом светодиодный облучатель состоит из модулей четырех типов светодиодов с длинами волн – 445 нм (синий), 660 нм (красный), 520 нм (зеленый), 395 нм (УФ-А). Дверца каждой камеры имеет остекление с зеркальной светоотражающей пленкой [17].

Дальнейшим совершенствованием конструктивно-технологической схемы фитотрона являются: интеллектуальная интенсификация технологического процесса; оперативное управление подачей воздуха с регулируемой температурой и влажностью, а также оптимизация и поддержание гидротермического режима.

Громоздкость конструкции описанного выше фитотрона [17], а также недостаточные интенсивность и степень управляемости технологическим процессом выращивания растений потребовали совершенствования его схемы, частично реализованной фитотроном [18].

Результаты и обсуждение

А. Конструктивно-технологическая схема разработанного фитотрона. Разработанный авторами фитотрон для интенсивного выращивания растений (решение о выдаче патента от 01.02.2022 по заявке № 2022130114 RU от 17.11.2022), содержит светопрозрачную рабочую камеру 1 с вегетационными лотками 2, лампами системы освещения 3 и транспортными колесами 20 (рис. 1). Система подачи воздуха 7 включает вентиляторы 6, подогреватели 8, анемоустат 9, обеспечивая подачу теплого воздуха на ярус камеры 1 с вегетационными лотками 2, в которые погружены датчики влажности 12 и кислотности 13 почвы. Система подачи питательного раствора 18 содержит емкость с питательным раствором 16, эжектор 15 для перемешивания раствора, насос 4 для подачи питательного раствора к лоткам 2.

Экспериментальный образец фитотрона на основе системы технического зрения для интенсивного выращивания растений с использовани-

ем глубокой нейронной сети (DNN) изготовлен в лаборатории кафедры математического моделирования и информатики Волгоградского ГАУ.

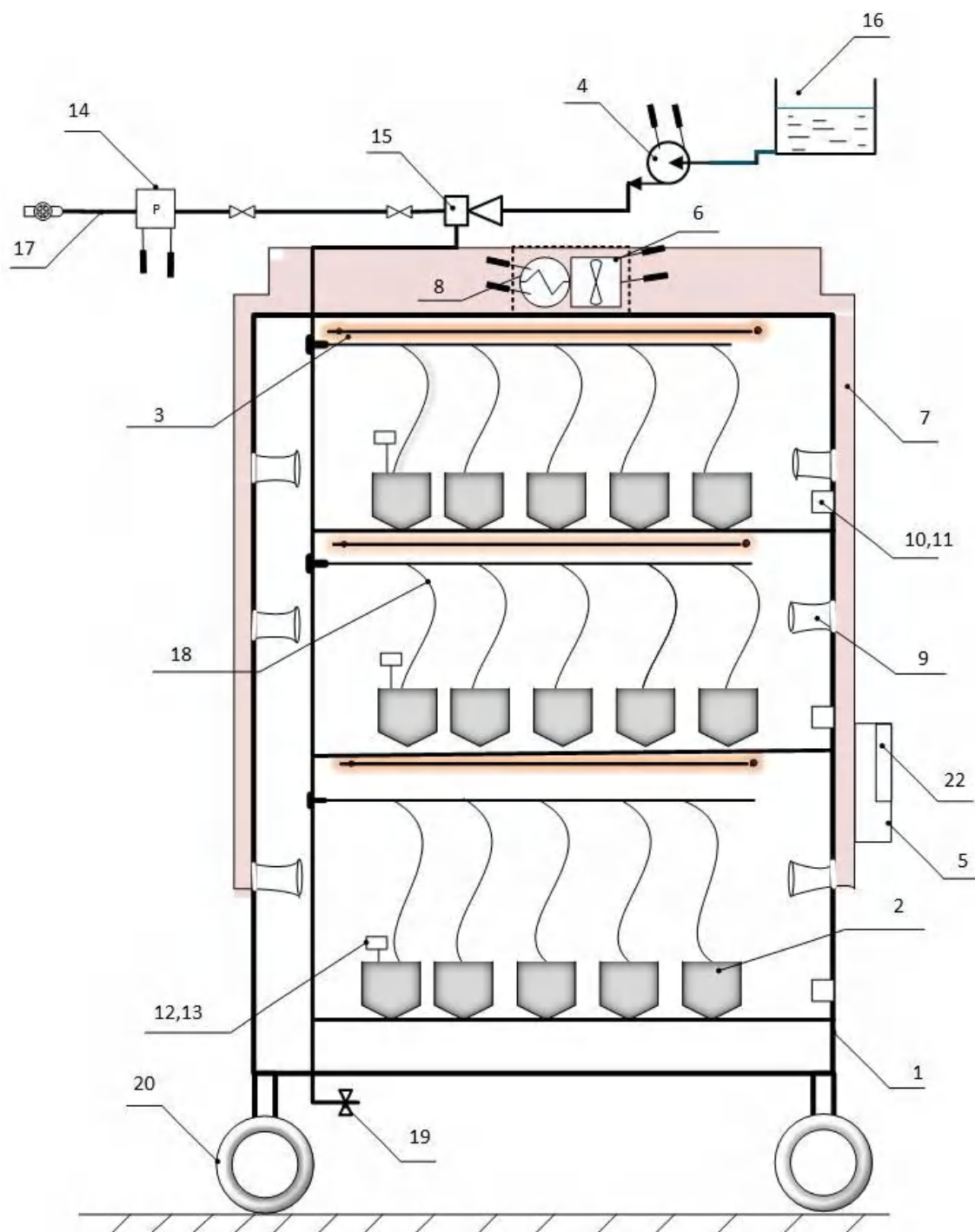


Рис. 1. Конструктивно-технологическая схема разработанного фитотрона

Фитотрон снабжен блоком дистанционного интеллектуального управления 22, содержащим блок визуализации состояния (рис. 1), блоком микропроцессорного управления 5, датчиками температуры воздуха 10, датчиками влажности воздуха 11, датчиками влажности почвы 12,

датчиками кислотности почвы 13, погруженными в вегетационные лотки 2. Выходы упомянутых датчиков 10–13 подключены ко входам блока микропроцессорного управления 5 с каналом дуплексной беспроводной связи, соединенным с блоком дистанционного интел-

лектуального управления 22. Выходы блока микропроцессорного управления 5 электрически связаны с лампами 3, вентилятором 6 и нагревателем 8 системы подачи воздуха 7 и с насосом 4 емкости 16 системы подачи питательного раствора 18.

Выходы блока микропроцессорного управления 5 электрически связаны с лампами 3 спектральных светильников (рис. 2) системы освещения, вентиляторами 6 и подогревателями 8 системы подачи воздуха 7. Электромагнитный клапан 14 обеспечивает подачу воды из водопровода 17 посредством капельниц системы подачи раствора 18. Слив воды из системы 18 обеспечивается техническим клапаном 19.

Блок дистанционного интеллектуального управления 22 выполнен в виде одноплатного миникомпьютера с операционной системой, обеспечивающей выполнение требуемого алгоритма согласования систем орошения, освещения, кондиционирования воздуха. Канал беспроводной связи выполнен в виде WiFi-соединения, обеспечивающего устойчивую дуплексную связь на расстоянии до 150 м. Блок визуализации управления состояния устройства сопряжен посредством WiFi-канала с блоком дистанционного интеллектуального управления 22.

В процессе выращивания вегетационные лотки 2 с растениями размещают на ярусах рабочей камеры 1. В лотки 2 помещают датчик влажности 12 и кислотности почвы 13. В процессе выращивания растений показатели гидротермического режима воздуха в камере 1

контролируются датчиками его температуры 10 и влажности 11, размещенными на ярусах камеры 1.

При рассогласовании показателей микроклимата воздуха и почвы в камере 1 относительно требуемых пороговых значений блок микропроцессорного управления 5 подает сигнал на включение питания исполнительных устройств – вентиляторов 6, подогревателей 8 системы подачи воздуха 7, либо насоса 4 системы подачи питательного раствора 18. Освещение растений осуществляется за счет ламп 3 с управляемым спектром, расположенными над лотками 2 с растениями в камере 1.

Активизация роста и развития растений осуществляется посредством поддержания оптимальных гидротермических показателей влажности почвы в вегетационных лотках 2 и температуры воздуха в камере 1, а также режима освещения на ярусах камеры 1, индицируемых на дисплее блока визуализации 22. При этом, в исследовательских целях, соответствующие режимы могут поддерживаться дифференцированно на различных ярусах, что обеспечивается регулированием анемостатов в каждом из ярусов и соответствующим программированием микропроцессорного блока управления 5.

Блок дистанционного управления 22, совместно с микропроцессорным блоком интеллектуального управления 5, позволяет дистанционно задавать, контролировать и регулировать параметры освещения и температурно-влажностных режимов.



Рис. 2. Светодиодный светильник системы регулируемого спектрального освещения фитотрона

Изображение вегетационного лотка с зелеными растениями, полученное видеосистемой фитотрона при проведении поисковых экспериментов и предназначенное для проведения интеллектуального нейросетевого анализа, приведено на рис. 3.



Рис. 3. Изображение вегетационного лотка с зелеными растениями

Б. Построение глубокой нейросети для интеллектуального анализа состояния растений. Для распознавания и интеллектуального анализа оперативного состояния растений была разработана глубокая ИНС на основе архитектуры ResNet с тремя параллельными потоками обработки, схема которой представлена на рис. 4. ИНС содержит сочетания сверточных и пулинговых слоев и обрабатывает входные RGB-изображения размером 256x256.

С целью уточнения архитектуры (ResNet, U-net) и параметров разработанной ИНС было проведено ее обучение с использованием многоклассового dataset, представляющего собой разбитые на четыре класса изображения здоровых и пораженных двумя видами мучнистой росы растений *Cucumbers*, сформированного на основе открытых источников сети Internet.

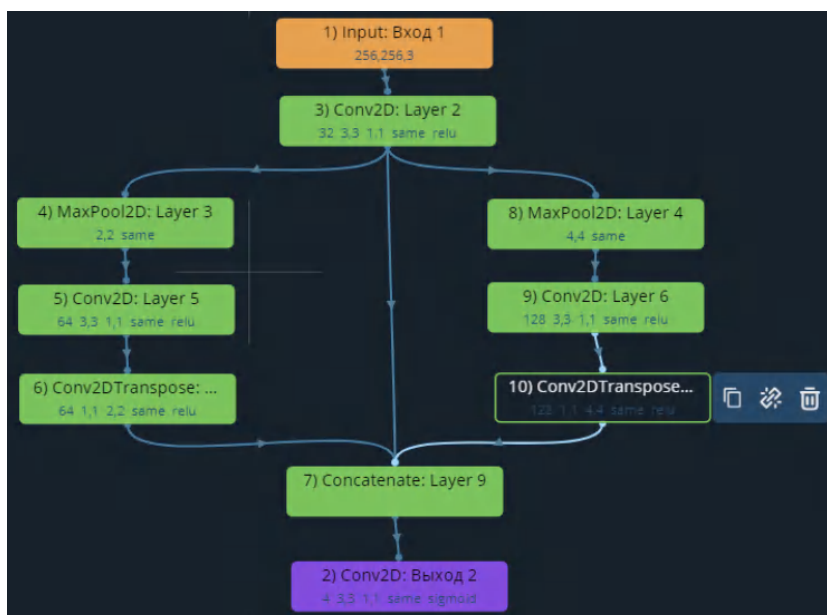


Рис. 4. Архитектура ИНС на основе ResNet параллельной структуры



Рис. 5. Диаграмма процесса обучения DNN с использованием метрики «ассигасу» продолжительностью 80 эпох

Диаграмма процесса обучения ИНС архитектуры U-net с использованием метрики «ассурасу» продолжительностью 80 эпох представлена на рис. 5. Достигнутая точность многоклассовой классификации в проведенных экспериментах составляет 92...95 % по метрике «ассурасу», что обусловлено случайными на-

чальными значениями весов нейронов при различных запусках нейросети.

Результаты распознавания состояния растений, в частности, их поражения мучнистой росой или ложной мучнистой росой, выявляемые с использованием разработанной глубокой ИНС, представлены на рис. 6.

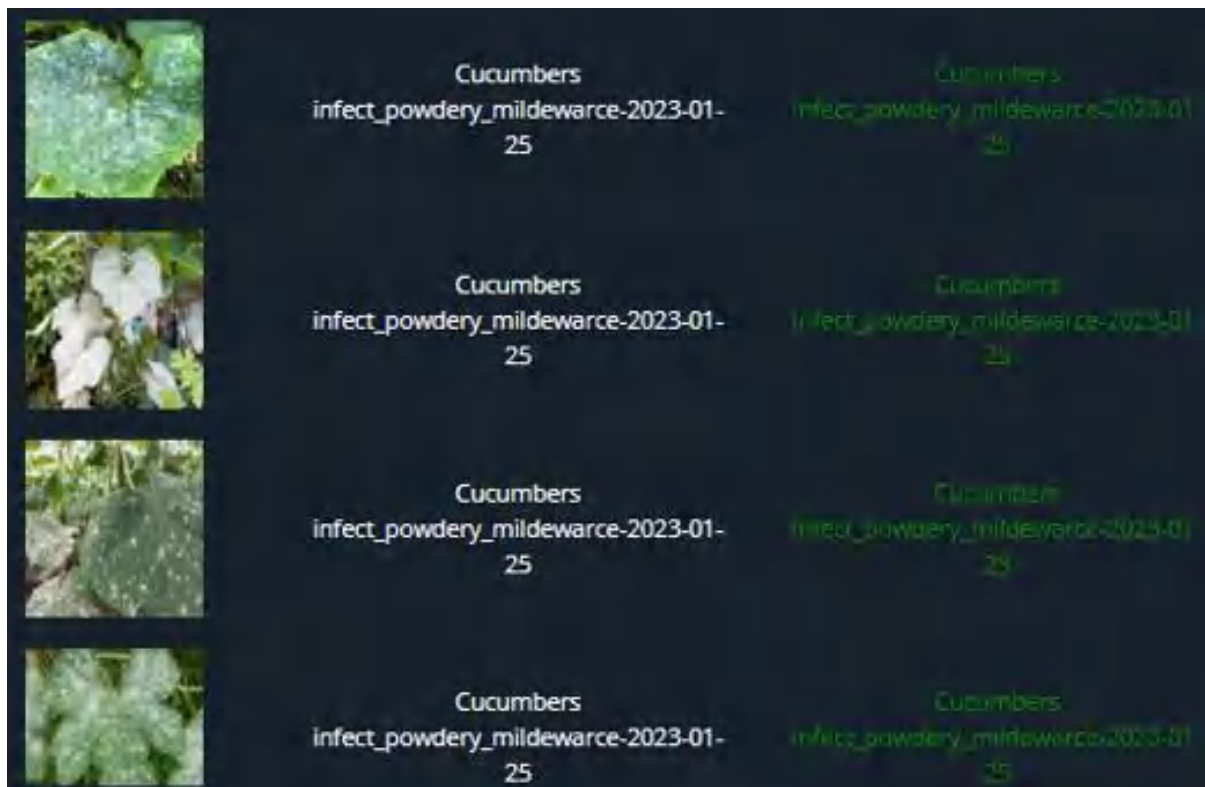


Рис. 6. Результаты интеллектуального распознавания заболеваний огурцов

В. Обсуждение результатов. Разработанная конструктивно-технологическая схема фитотрона (защищенная патентом по заявке № 2022130114) обеспечивает интенсификацию процесса выращивания растений защищенного грунта за счет реализации микропроцессорного управления основными обеспечивающими системами – орошения, кондиционирования и спектрального освещения.

Полученные в поисковых экспериментах результаты нейросетевой классификации поражений растений позволяют рекомендовать обе исследованные архитектуры глубоких ИНС (ResNet, U-net) для использования в фитотронных комплексах для интенсивного выращивания растений. При этом разрешение цветных изображений размерностью 256x256 является достаточным при условии размеров пораженных областей свыше 30 % анализируемой площади.

По аналогичной схеме в настоящее время создается и глубокая ИНС для распознавания различных заболеваний растений, выращиваемых в теплицах с минимальным использованием средств защиты растений, для которых максимально раннее выявление поражений имеет особенно важное значение. Решение такой задачи существенно облегчается с использованием глубоких ИНС для многоклассовой классификации.

В качестве направления продолжения исследований намечено исследование влияния различных гиперпараметров глубокой ИНС гибридной архитектуры, построенной на основе параллельных потоков, на показатели качества распознавания состояния растений, выращиваемых фитотронным методом.

Выводы

Проведенные исследования позволили получить следующие научные результаты:

1. Разработанная конструктивно-технологическая схема фитотрона для выращивания растений (патент RU по заявке № 2022130114) обеспечивает интенсификацию технологического процесса за счет реализации микропроцессорного управления основными системами обеспечения – орошения, кондиционирования воздуха и спектрального освещения.

2. Система компьютерного зрения, сопряженная с глубокой ИНС, после обучения и оптимизации гиперпараметров, обеспечивает распознавание состояния растений, а также их поражение вредителями и/или заболеваниями. Достигнутая точность классификации составляет 92...95 % по метрике «ассигасу».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Об утверждении Федеральной научно-технической программы развития сельского хозяйства на 2017–2025 годы : Постановление правительства Российской Федерации от 25.08.2017 № 996 // Официальный интернет-портал правовой информации, 2017. – 87 с.
2. Актуальные аспекты создания интеллектуальных сельхозмашин и спецтехники в России : моногр. / В. Е. Большев, Д. В. Назаренко, И. Н. Ефременко [и др.]. – Ростов н / Д, 2021. – 110 с.
3. Беспилотное мобильное транспортное средство для мониторинга сельскохозяйственных и лесных угодий / Д. М. Порубов, А. М. Беляев, П. О. Береснев [и др.] // Известия МГТУ МАМИ. – 2017. – № 1 (31). – С. 47–56.
4. О синтезе роботизированного сельскохозяйственного мобильного агрегата / А. Ю. Измайлов, Я. П. Лобачевский, Ю. С. Ценч [и др.] // Вестник российской сельскохозяйственной науки. – 2019. – № 4. – С. 63–68.
5. Метод управления робототехническим комплексом на основе глубокого обучения с подкреплением рекуррентных нейронных сетей для автоматического сбора тепличных культур / В. И. Петренко, Ф. Б. Тебуева, М. М. Гурчинский, В. О. Антонов // В сб.: Информационные технологии интеллектуальной поддержки принятия решений (ITDS'2020). Труды VIII Всероссийской научной конференции. – Уфа, 2020. – С. 78–85.
6. Проектирование робототехнических манипуляторов с системой компьютерного зрения для сбора томатов / А. В. Рыбаков, А. М. Лихтер, А. Б. Погожева, А. В. Михайлова, А. Б. Дусалиев // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2020. – № 3 (51). – С. 135–147.
7. Разработка интеллектуальной интегрированной системы «Умное поле» / З. В. Нагоев, В. М. Шуганов, А. У. Заммоев, К. Ч. Бжихатлов, З. З. Иванов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2022. – № 1 (225). – С. 81–91.
8. *Рогачев, А. Ф.* Моделирование динамики технологических процессов сельскохозяйственных погрузочно-транспортных агрегатов с гидроманипуляторами / А. Ф. Рогачев. – Волгоград : Изд-во Волгоградского государственного аграрного университета, 2017. – 188 с.
9. *Рубцов, И. В.* Использование технологий специального назначения в сельскохозяйственной робототехнике / И. В. Рубцов, О. Г. Русанова, З. А. Годжаев // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2018. – Т. 12. – № 1. – С. 37–41.
10. *Сальникова, Е. В.* Применение робототехнических средств в отрасли животноводства / Е. В. Сальникова // Современные научные исследования и разработки. – 2018. – № 9 (26). – С. 358–362.
11. *Kai, Ch.* Research on the development trend of agricultural robot technology based on patent map / Chen Kai [et al.] // Journal of Agricultural Mechanization Research. – 2016. – No 38(09). – Pp.1–9.
12. *Xing, Ying* Research Frontiers of International Agricultural Machinery Based on Bibliometrics / Xing Y. [et al.] // Agricultural Engineering. – 2018. – No 8(06). – P. 1.
13. International competition situation and research frontiers of agricultural robots /Yuan Jianxia [et al.] // Agricultural Engineering. – 2019. – No 9 (09). – Pp. 1–5.
14. New robotics projects by the European Union // European Commission. – URL : <http://ec.europa.eu/digitalagenda/en/news/new-robotics-projects-2015> (announced 14.01.2021).
15. *Melikhova, E. V.* Computer simulation and optimization of parameters of configuration of the contour of moistening under drip irrigation of agricultures / E. V. Melikhova, A. F. Rogachev // Studies in Computational Intelligence. – 2019. – Т. 826. – Pp. 1193–1201.
16. Пат. Российская Федерация, 173771 U1. МПКG 01 N 33/24, A 01 G 25/16. Стенд для моделирования процессов влагообмена в почвогрунте при выращивании корнеплодов на капельном орошении / Е. В. Мелихова, А. Ф. Рогачев, В. В. Бородычев. – Оpubл. 11.09.17, Бюл. № 26.
17. Пат. Российская Федерация, 206253U1. МПК A01G 31/02, A01G 7/045. Фитотрон энергосберегающий универсальный модульный / В. А. Петрухин, Д. С. Ивушкин, А. С. Феклистов. – Оpubл. 02.09.21, Бюл. № 25.
18. Пат. Российская Федерация, 49420 U1.МПКА01G 9/14, A01G 31/00. Бытовой фитотрон / М. В. Авдеев, В. М. Попов, Е. М. Басарыгина. – Оpubл. 27.11.05, Бюл. № 33.

УДК007.52 + 621.865.8
DOI 10.35211/1990-5297-2023-4-275-89-95

А. А. Хачатрян, Е. С. Брискин

О ПЕРЕМЕЩЕНИИ ТРЕХОПОРНОГО МОБИЛЬНОГО РОБОТА ПО ПРОИЗВОЛЬНО ОРИЕНТИРОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ*

Волгоградский государственный технический университет

Agram-081097@mail.ru, dtm@vstu.ru

Предложена расчетная схема и математическая модель трехопорной робототехнической системы, предназначенной для перемещения по произвольно ориентированной поверхности за счет управления величиной и направлением усилия, развиваемого актуатором. Рассмотрен квазистатический режим движения, определены параметры управления в зависимости от массово-геометрических характеристик робототехнической системы и действующих на нее внешних сил.

Ключевые слова: мобильные робототехнические средства, перемещение, математическая модель, произвольно ориентированная поверхность.

A. A. Khachatryan, E. S. Briskin

ON THE DISPLACEMENT OF A THREE-SUPPORT MOBILE ROBOT ON ARBITRARILY ORIENTED SURFACE

Volgograd State Technical University

The design scheme and mathematical model of a three-support robotic system designed to move along arbitrarily oriented surface by controlling the magnitude and direction of the force developed by the actuator is presented in this article. The quasi-static mode of motion is considered, control parameters are determined depending on the mass-geometric characteristics of the robotic system and the external forces acting on it.

Keywords: mobile robotics, displacement, mathematical model, arbitrarily oriented surface.

Введение

Задача передвижения робототехнических систем по произвольно ориентированным поверхностям важна и актуальна. Такие устройства могли бы выполнять целый спектр задач: исследование крупногабаритных сооружений на наличие конструктивных дефектов; выполнение технологических операций на труднодоступных поверхностях, в том числе исключая присутствие человека (рис. 1), и др.

Под произвольно ориентированными поверхностями понимается относительно ровная поверхность, расположенная под углом от 0 до 90° к горизонтали.

Основной целью создания робототехнических систем, перемещающихся по произвольно расположенным в пространстве поверхностям, является повышение безопасности людей при выполнении опасных работ в труднодоступных условиях (рис. 1) и технико-экономической

эффективности технологических процессов, в том числе за счет отказа от дорогостоящей сборки строительных лесов [1].

Известны разработки лазающих роботов для перемещения по произвольно ориентированным поверхностям и выполнения задач: от уборки до осмотра труднодоступных поверхностей за счет вакуумных устройств, электромагнитного взаимодействия, адгезии, тросовых движителей и др. [2–12].

Анализ их достоинств и недостатков позволил выбрать за основу робот, опирающийся на обрабатываемую поверхность за счет прижатия к ней манипулятором, выполненным на основе трипода [13, 14]. Однако вместо трипода можно использовать более простой одноопорный механизм, в котором за счет работы одного линейного привода и осуществляется реализация усилия «прижатия» робота к обрабатываемой поверхности [15].

© Хачатрян А. А., Брискин Е. С., 2023.

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-21-00882, <https://rscf.ru/project/22-21-00882/>

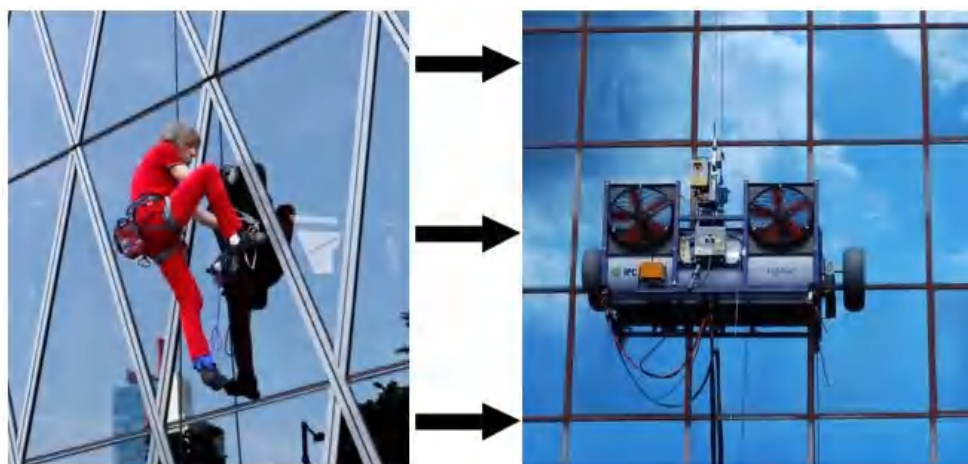


Рис. 1. Очистка вертикальных стеклянных поверхностей человеком и роботом

Особенность работы такой робототехнической системы с одним линейным приводом состоит в том, что установленные массо-геометрические параметры должны исключить возможность передачи изгибающих усилий на рабочие элементы привода.

1. Постановка задачи

Рассматривается пространственная задача о квазистатическом режиме движения робототехнической системы, прижатие которой к рабочей поверхности осуществляется за счет внешнего усилия. Ставится задача определения направления, точки приложения и величины прижимного усилия робота к рабочей поверхности, развиваемого актуатором, обеспечивающих устойчивое равновесие всей робототехнической системы и исключающих действия на актуатор изгибающего и крутящего моментов.

2. Расчетная схема робототехнической системы с одной опорой

Расчетная схема рассматриваемой робототехнической системы с одной опорой на горизонтальную поверхность представлена на рис. 2. Рассматривается квазистатический режим движения робототехнической системы, которая состоит из робота 1, представленного на рис. 2 характерной поверхностью S , перемещающегося по произвольно ориентированной (рабочей) поверхности 2, опираясь на нее j опорами 3, где $1 \leq j \leq K$, за счет приложенного со стороны актуатора 4 усилия P . Актуатор при этом закреплен на опорной (для актуатора) поверхности 5.

Использованы следующие обозначения: C – центр масс робота; e_G – вертикальная координата центра масс робота; c_j, e_j – соответственно координаты j -й опоры робота в плоскости XOY ;

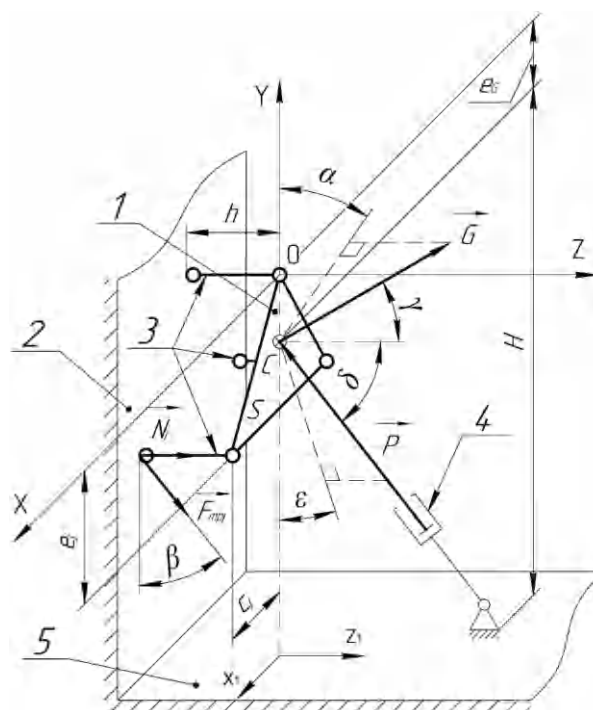


Рис. 2. Расчетная схема робота с прижимным механизмом

h – расстояние от характерной поверхности S до произвольно ориентированной (рабочей) поверхности; H – расстояние от горизонтальной поверхности до точки приложения усилия прижатия; N_j – реакция j -й опоры; $F_{трj}$ – сила трения между j -й опорой и произвольно ориентированной поверхностью; G – главный вектор, образованный силой тяжести мобильного робота и реакцией рабочего инструмента; x_1, y_1 – локальная система координат на опорной поверхности; γ – угол между главным вектором G и осью Z ; δ – угол между усилием P и отрицательным направлением оси Z ; α – угол между проекцией главного вектора G на плоскость

XOY и осью Y ; ε – угол между проекцией усилия P на плоскость XOY и осью Y ; β – угол между силой трения j -й опоры и осью Y . Величина угла β для всех опор принимается одинаковой в силу предположения о поступательном возможном перемещении робота по произвольно ориентированной поверхности.

3. Метод решения

Для решения поставленной задачи составляются уравнения равновесия робота, в которых используется угол β , характеризующий возможное направление проскальзывания опор робота по произвольно ориентированной (рабочей) поверхности. Для его нахождения составляется уравнение:

$$\operatorname{tg}\beta = \frac{R_x}{R_y}. \quad (1)$$

Для этого определяем R_x и R_y – проекции сил, стремящихся привести робота в движение за счет внешних сил P и G :

$$\begin{aligned} R_x &= P \sin \delta \sin \varepsilon - G \sin \gamma \sin \alpha, \\ R_y &= P \sin \delta \cos \varepsilon + G \sin \gamma \cos \alpha. \end{aligned} \quad (2)$$

При этом, в силу принятых допущений, не учитывается возможное скольжение за счет поворота, вызываемого моментом сил P и G относительно центра масс C . Поэтому рассматривается режим работы актуатора на сжатие и растяжение, исключаяющий воздействие на него изгибающих и крутящих моментов.

Используя выражения (1) и (2), определяем угол β :

$$\beta = \operatorname{arctg} \left(\frac{P \sin \delta \sin \varepsilon - G \sin \gamma \sin \alpha}{P \sin \delta \cos \varepsilon + G \sin \gamma \cos \alpha} \right). \quad (3)$$

Уравнения равновесия робота:

$$\begin{cases} \sum F_x = 0, \\ \sum F_y = 0, \\ \sum F_z = 0, \\ \sum M_x = 0, \\ \sum M_y = 0, \\ \sum M_z = 0, \end{cases} \begin{cases} P \sin \delta \sin \varepsilon - G \sin \gamma \sin \alpha - \sum F_{\operatorname{тр}j} \sin \beta = 0, \\ P \sin \delta \cos \varepsilon + G \sin \gamma \cos \alpha - \sum F_{\operatorname{тр}j} \cos \beta = 0, \\ -P \cos \delta + G \cos \gamma + \sum N_j = 0, \\ -P \cos \delta \cdot e_G + G \cos \gamma \cdot e_G + \sum N_j e_j + \sum F_{\operatorname{тр}j} \cos \beta \cdot h = 0, \\ \sum N_j c_j - \sum F_{\operatorname{тр}j} \sin \beta \cdot h = 0, \\ -P \sin \delta \sin \varepsilon \cdot e_G + G \sin \gamma \sin \alpha \cdot e_G + \sum F_{\operatorname{тр}j} \sin \beta \cdot e_j + \\ + \sum F_{\operatorname{тр}j} \cos \beta \cdot c_j = 0. \end{cases} \quad (4)$$

Уравнения (4) дополняются уравнением

$$F_{\operatorname{тр}j} = \mu N_j, (j = 1 \dots K), \quad (5)$$

где $0 \leq \mu \leq f$.

В критической ситуации, когда может начаться движение $\mu = f$, где f – коэффициент трения между опорами робота и произвольно ориентированной поверхностью.

В частном случае, если робот имеет три опоры ($j = 3$), взаимодействующие с произвольно ориентированной поверхностью, используя выражение (5) и систему уравнений (4), получим уравнения равновесия робота в следующем виде:

$$\begin{cases} \mu G \cos \gamma \sin \beta - \mu P \cos \delta \sin \beta - G \sin \gamma \sin \alpha + P \sin \delta \sin \varepsilon = 0, \\ \mu G \cos \gamma \cos \beta - \mu P \cos \delta \cos \beta + G \sin \gamma \cos \alpha + P \sin \delta \cos \varepsilon = 0, \\ G \cos \gamma - P \cos \delta + N_1 + N_2 + N_3 = 0, \\ -\mu Gh \cos \beta \cos \gamma + \mu Ph \cos \beta \cos \delta + G \cos \gamma \cdot e_G - P \cos \delta \cdot e_G + \\ + e_1 N_1 + e_2 N_2 + e_3 N_3 = 0, \\ \mu Gh \cos \gamma \sin \beta - \mu Ph \cos \delta \sin \beta + c_1 N_1 + c_2 N_2 + c_3 N_3 = 0. \end{cases} \quad (6)$$

Решение системы уравнений (6) относительно реакций опор робототехнической сис-

темы N_1, N_2, N_3 , усилия линейного привода P и коэффициента трения μ имеет вид:

$$\left\{ \begin{aligned} P &= -\frac{G \cos \beta \sin \alpha \sin \gamma + G \sin \beta \cos \alpha \sin \gamma}{\sin \delta (\sin \beta \cos \varepsilon - \cos \beta \sin \varepsilon)}, \\ \mu &= \frac{\sin \gamma (\cos \varepsilon \sin \alpha + \sin \varepsilon \cos \alpha)}{\cos \gamma (\cos \varepsilon \sin \beta - \sin \varepsilon \cos \beta) + \operatorname{ctg} \delta \sin \gamma (\cos \beta \sin \alpha + \sin \beta \cos \alpha)}, \\ N_1 &= f(G, h, c_1, c_2, c_3, e_1, e_2, e_3, e_G, \beta, \varepsilon, \alpha, \gamma, \delta), \\ N_2 &= f(G, h, c_1, c_2, c_3, e_1, e_2, e_3, e_G, \beta, \varepsilon, \alpha, \gamma, \delta), \\ N_3 &= f(G, h, c_1, c_2, c_3, e_1, e_2, e_3, e_G, \beta, \varepsilon, \alpha, \gamma, \delta). \end{aligned} \right. \quad (7)$$

4. Имитационное моделирование

Начальные данные для имитационного моделирования приведены ниже в таблице. Отрицательное значение углов означает их построение по ходу часовой стрелки.

Для указанных начальных данных были по-

строены графики зависимости значений усилия P от угла δ между усилием P и отрицательным направлением оси Z и угла δ от коэффициента трения μ для построения области установки опоры механизма прижатия на опорной поверхности (рис. 3 и 4).

Начальные данные для имитационного моделирования

$G = 100 \text{ Н}$	$h = 0,2 \text{ м}$	$c_1 = 0,5 \text{ м}$	$c_2 = 0 \text{ м}$	$c_3 = -0,5 \text{ м}$
$e_G = -0,3 \text{ м}$	$e_1 = -0,3 \text{ м}$	$e_2 = 0 \text{ м}$	$e_3 = 0,3 \text{ м}$	
$\gamma = 45^\circ$	$\alpha = -30^\circ$	$\beta = 60^\circ$	$\varepsilon = 0^\circ$	

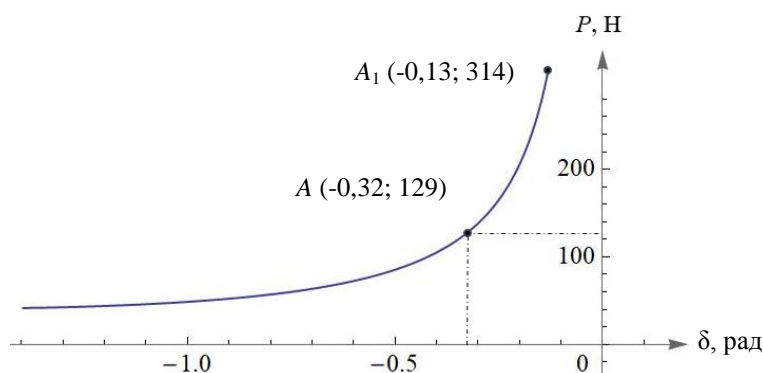


Рис. 3. График зависимости P от δ

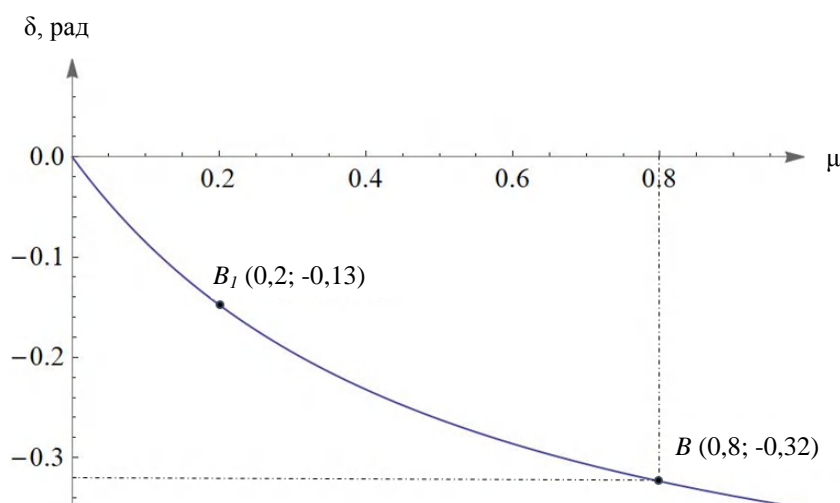


Рис. 4. График зависимости δ от μ

Анализ графиков на рис. 3 и 4 позволяет выделить диапазон углов δ между усилием P и осью Z для значений коэффициента трения μ , не превышающих 0,8 (значение выбрано для пары трения резина – сталь). При этом уменьшение коэффициента трения μ ведет к уменьшению абсолютного значения угла δ , и направление воздействия усилия на произвольно ориентированную поверхность становится близким к перпендикулярному. Однако уменьшение коэффициента трения μ приводит к возрастанию значений усилия P (рис. 3).

Таким образом, получен диапазон углов δ от $-0,32$ рад до $-0,13$ рад ($-18,3^\circ$; $-7,5^\circ$), обеспечивающих квазистатическое равновесие робота при начальных условиях, выбранных из таблицы. Полученному диапазону углов δ соответствуют диапазоны значений:

- усилия прижатия P от 129 до 314 Н (точки A и A_1 , рис. 3);
- коэффициента трения μ от 0,8 до 0,2 (точки B и B_1 , рис. 4).

Для оценки работоспособности робота получены значения реакций опор при указанных в таблице начальных данных (рис. 5).

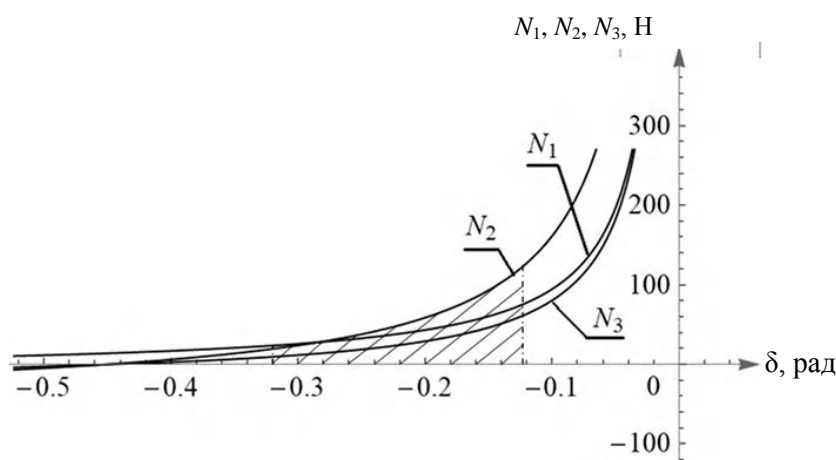


Рис. 5. График зависимости значений реакций опор N_1, N_2, N_3 от δ

Реакции опор в диапазоне углов δ от $-0,32$ до $-0,13$ рад ($-18,3^\circ$; $-7,5^\circ$) принимают значения от 10 до 115 Н (заштрихованная область на рис. 5). Положительные значения реакций опор подтверждают работоспособность предложенной робототехнической системы.

Для построения области установки опоры механизма прижатия на опорной поверхности получен диапазон углов ϵ от $-1,95$ рад до $0,5$ рад ($-111,7^\circ$; $28,7^\circ$), обеспечивающих квазистатическое равновесие робота при начальных условиях, выбранных из таблицы и значении угла $\delta = 12,9^\circ$.

Реакции опор в диапазоне углов ϵ от $-1,95$ рад до $0,5$ рад принимают положительные значения от 16 до 450 Н, что также подтверждает работоспособность предложенной робототехнической системы.

Область установки опоры механизма прижатия на горизонтальной поверхности при начальных данных, указанных в таблице, и расстоянии от горизонтальной поверхности до точки приложения усилия прижатия $H = 3$ м, показана на рис. 6.

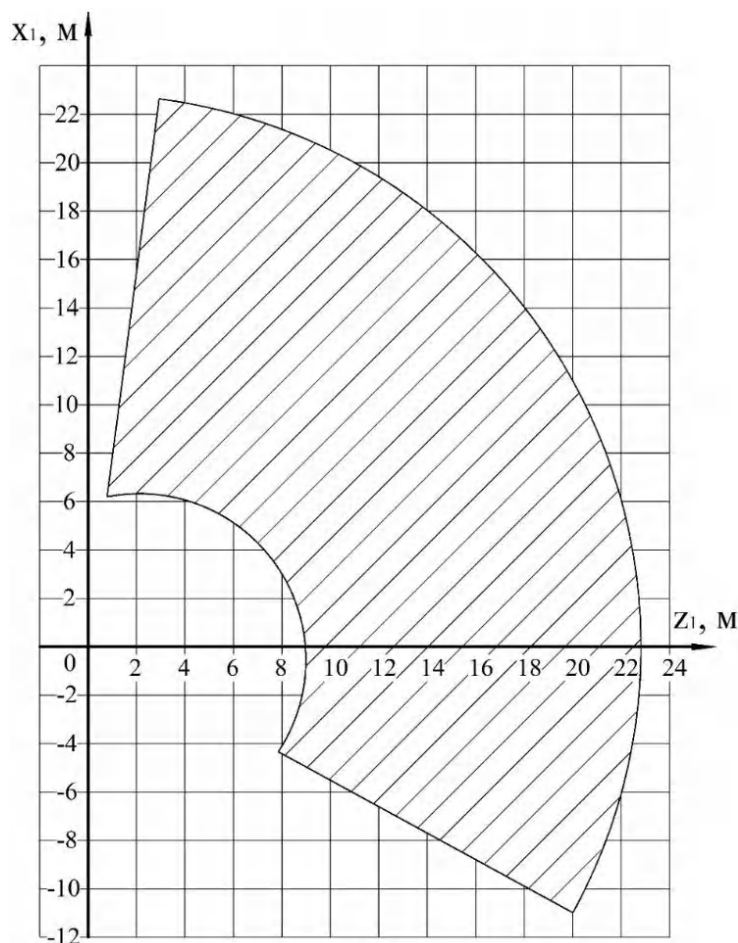


Рис. 6. Область установки опоры механизма прижатия

Выводы

Решена пространственная задача о равновесии робототехнической системы, прижатие которой к рабочей поверхности осуществляется за счет внешнего усилия (актуатора):

– получены уравнения равновесия предложенной робототехнической системы и выражения для определения значения прижимного усилия и требуемого коэффициента трения, обеспечивающих работоспособность робототехнической системы, а также значения реакций опор;

– определена область установки опоры механизма прижатия на опорной поверхности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Silva, Manuel & Tenreiro Machado, José. A Survey of Technologies and Applications for Climbing Robots Locomotion and Adhesion. 10.5772/8826. – 2010.
2. Градецкий, В. Г. Состояние и перспективы развития роботов вертикального перемещения для экстремальных сред / В. Г. Градецкий, М. М. Князьков // Робототехника и техническая кибернетика. – 2014. – № 1 (2). – С. 9–16.
3. Градецкий, В. Г. Роботы вертикального перемещения / В. Г. Градецкий, М. Ю. Рачков. – М.: Тип. Мин-ва образования РФ, 1997. – 223 с.
4. Biomimetic mushroom-shaped fibrillary adhesive microstructure / S. Gorb, M. Varenberg, A. Peressadko, J. Tuma // J. R. Soc. Interface. – 2006. – Pp. 1–6.
5. Parker, Richard & Bayne, Karen & Clinton, Peter. Robotics in forestry // New Zealand Journal of Forestry. – 2016. – No. 60. – Pp.8–14.
6. Побегайлов, О. А. Мобильные роботы вертикального перемещения / О. А. Побегайлов, И. В. Кравченко, С. О. Кожуховский // Инженерный вестник Дона. – 2010. – № 4 (14). – С. 85–95.
7. Хачатрян, А. А. Мобильные робототехнические системы, перемещающиеся по произвольно ориентированным поверхностям: основные недостатки, достоинства, перспективы использования / А. А. Хачатрян // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 4 (263) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2022. – (Серия «Роботы, мехатроника и робототехнические системы»). – С. 57–64.
8. Hirose, S. and Kawabe, K. Ceiling Walk of Quadruped Wall Climbing Robot NINJA-II // Proc. Int. Conf. on Walking and Climbing Robots (CLAWAR '98), Brussels, Belgium, 1998.
9. Development of Magnetic Bridge Inspection Robot Aimed at Carrying Heavy Loads. Yogo Takada, Department of Mechanical and Physical Engineering, Osaka City University.

sity, 3-3-138 Sugimoto, Sumiyoshi-ku, Osaka-shi, Osaka, 558-8585, Japan. Accepted: September 18, 2018; Published: September 20, 2018.

10. City Climber: a new generation of mobile robot with wall-climbing capability / J. Xiao, W. Morris, N. Chakravarthy, A. Calle // Proc. of the SPIE. – Vol. 6230. – 2006. – Pp. 62301.

11. Some problems of controlling the cable propulsion devices of mobile robots / E. S. Briskin, N. G. Sharonov, M. I. Efimov [et al.] // Robots in Human Life- Proceedings of the 23rd International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines, CLAWAR 2020: 23rd, Moscow, 24–26 августа 2020 года. – Moscow, 2020. – Pp. 321–328.

12. Барсов, В. С. Об управлении движением робота с поворотнo-заклинивающими движителями / В. С. Барсов, Е. С. Брискин // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 3 (226) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2019. – (Серия «Ро-

боты, мехатроника и робототехнические системы»). – С. 7–12.

13. Разработка базы моделей манипулятора параллельно-последовательной структуры / Н. С. Воробьева, В. В. Жога, В. В. Дяшкин-Титов, А. В. Дяшкин // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2017. – № 9 (194). – С. 143–152.

14. Кинематическое исследование манипулятора трипода / В. М. Герасун, В. В. Жога, И. А. Несмиянов, Н. С. Воробьева, В. В. Дяшкин-Титов // Современное машиностроение. Наука и образование : Материалы 2-й Международной научно-практической конференции. – СПб., 2012. – С. 251–258.

15. Хачатрян, А. А. О перемещении мобильного робота по произвольно ориентированным поверхностям / А. А. Хачатрян, Е. С. Брискин // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 9 (268) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2022. – С. 86–93.

Ответственный за выпуск
Ирина Петровна **ВЕРШИНИНА**

Оригинал-макет и электронная версия издания
подготовлены редакционно-издательским отделом
Издательства ВолгГТУ

Корректурa **Л. Н. Рыжих**
Компьютерная верстка: **Е. В. Макарова**

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77–61113 от 19 марта 2015 г.
Федеральной службы по надзору в сфере связи, информационных технологий
и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

Учредитель:
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Волгоградский государственный технический университет» (ВолгГТУ)

Адрес редакции и издателя: 400005, г. Волгоград, просп. В. И. Ленина, 28.
Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ)
Телефон: гл. редактор – (8442) 24-80-00
E-mail: president@vstu.ru

Темплан 2023 г. Поз. № 7ж. Дата выхода в свет 28.04.2023 г. Формат 60 x 84 1/8.
Бумага офсетная. Гарнитура Times. Печать офсетная. Усл. печ. л. 11,16. Уч.-изд. л. 9,94.
Тираж 100 экз. Свободная цена. Заказ № 219.

Отпечатано в типографии Издательства ВолгГТУ
400005, г. Волгоград, просп. В. И. Ленина, 28, корп. 7.

В научном журнале «Известия ВолгГТУ», серия «Роботы, мехатроника и робототехнические системы», публикуются статьи, которые содержат результаты теоретических и экспериментальных исследований в области механики и управления движением робототехнических систем и их мехатронных узлов.

Вопрос об опубликовании статьи или ее отклонении решает редакционная коллегия журнала, которая утверждается ректором университета, ее решение является окончательным. Редколлегия направляет представленный для издания материал на рецензирование.

Рукопись должна быть набрана и сверстана в текстовом редакторе Word 2003-2007 и распечатана на лазерном принтере в режиме полной загрузки тонера. Формат бумаги А4 (210×297 мм). УДК статьи обязательно.

Для ускорения подготовки издания необходимо отправлять файлы статей на электронный адрес *rm@vstu.ru* в полном соответствии с распечатанным оригиналом.

При наборе текста следует соблюдать следующие требования: поля – верхнее – 2,0 см; нижнее – 3,0 см; левое – 2,5 см; правое – 2,5 см; шрифт Times, кегль 14, интервал полторный.

Текст набирается с применением автоматического переноса слов, перед знаками препинания (в том числе внутри скобок) пробелы не допускаются, после них ставится один пробел. Разрядка слов не допускается, следует избегать перегрузки статей большим количеством формул, рисунков, таблиц. Для набора формул следует использовать встраиваемый формульный процессор Math Type. Формулы в тексте должны быть напечатаны без дополнительных интервалов между строками текста. Нумеруются только те формулы, на которые есть ссылки в тексте. Нумерация формул по всей статье должна быть сквозной. Таблицы должны содержать заголовки. В компьютерном варианте иллюстрации следует готовить в векторных форматах. В растровых форматах допускаются только фотографии.

В тексте, формулах и на рисунках латинские буквы следует набирать *курсивом*. Русские и греческие буквы, цифры, стандартные функции (sin, cos, sign, max, const, log, det, exp и т. п.) должны иметь прямое начертание. В основе матриц лежат круглые скобки, в основе определителей – прямые линии.

Инициалы и фамилия автора (авторов) пишутся над заглавием статьи. Ниже заглавия, перед основным текстом, указывается организация или предприятие, на котором работает автор статьи. Если коллектив авторов включает сотрудников различных учреждений, необходимо указать место работы каждого автора. Далее – электронный адрес (-а) авторов, аннотация к статье и ключевые слова (на русском и английском языках). В конце статьи ставится подпись автора (на бумажном варианте).

Литературные ссылки должны быть оформлены в соответствии с ГОСТ 7.1–2003 «Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления». Библиографический список использованной литературы, составленный в порядке упоминания в тексте, дается в конце статьи; связь с основным текстом осуществляется цифровым порядковым номером в квадратных скобках в строке. Подстрочные ссылки не допускаются.

Иностранные фамилии и термины в тексте следует приводить в русском переводе. В библиографическом списке фамилии авторов, полное название книг и журналов приводятся на языке оригинала.

Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

При обозначении единиц физических величин должна применяться Международная система единиц (СИ).

Рекомендованный объем статьи – **8–9 страниц** бумаги формата А4, включая таблицы и библиографический список.

Рекомендуется включать в журнал статьи с авторским коллективом не более четырех человек с участием каждого автора в одной-двух статьях.

Статьи должны представлять сжатое четкое изложение результатов, полученных автором без повторов приводимых данных в тексте статьи, таблицах и рисунках. К статье должны быть приложены: сведения об авторах (полное имя, отчество, фамилия, ученая степень, звание, домашний адрес, номера служебного и домашнего телефонов, E-mail); документация, подтверждающая возможность ее открытого опубликования.