

На правах рукописи



Буличев Олег Викторович

**Разработка метода тактильного ощущения для мобильного
шагающего робота**

2.5.4. Роботы, мехатроника и робототехнические системы
(технические науки)

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Волгоград — 2024

Работа выполнена в Институте робототехники и компьютерного зрения Автономной некоммерческой организации высшего образования АНО ВО «Университет Иннополис».

Научный руководитель Доктор физико-математических наук, доцент
Малолетов Александр Васильевич.

Официальные оппоненты: **Яцун Сергей Федорович**,
доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Юго-Западный государственный университет», кафедра механики, мехатроники и робототехники, заведующий;
Воротников Сергей Анатольевич,
кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана», кафедра «Робототехнические системы и мехатроника», доцент.

Ведущая организация Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», г. Ростов-на-Дону.

Защита состоится «19» сентября 2024 г. в 10.00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.282.07, созданного на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Волгоградский государственный технический университет» по адресу: 400005, г. Волгоград, проспект им. В. И. Ленина, 28, ауд. 209.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБУ ВО «Волгоградский государственный технический университет» и на сайте www.vstu.ru по ссылке <https://www.vstu.ru/upload/iblock/2b1/2b15225ae9aedc451354ef9268a06c2f.pdf>.

Автореферат разослан « _____ » _____ 2024 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Попов Андрей Васильевич

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. Возможные направления применения мобильных роботов включают в себя использование их для исследовательских целей в труднодоступных условиях. Мобильные роботы могут проникать в места, недоступные и опасные для людей, например, в пещеры и шахты, перемещаться под завалами или внутри помещений во время стихийных бедствий, аварийных ситуаций и так далее. Одним из наиболее интересных и малоизученных направлений является разработка мобильных роботов, предназначенных для движения в условиях пещер естественного происхождения.

Движение по пещере часто происходит по опасным и труднопроходимым участкам. Наиболее опасными являются сифоны (рис. 1б), сталактиты, сталагмиты, обилие скользких грунтов (рис. 1в, 1г и 1е). В пещерах недостаток света, часто влажно. Встречаются участки, покрытые водой (рис. 1д) и растительностью (рис. 1е).

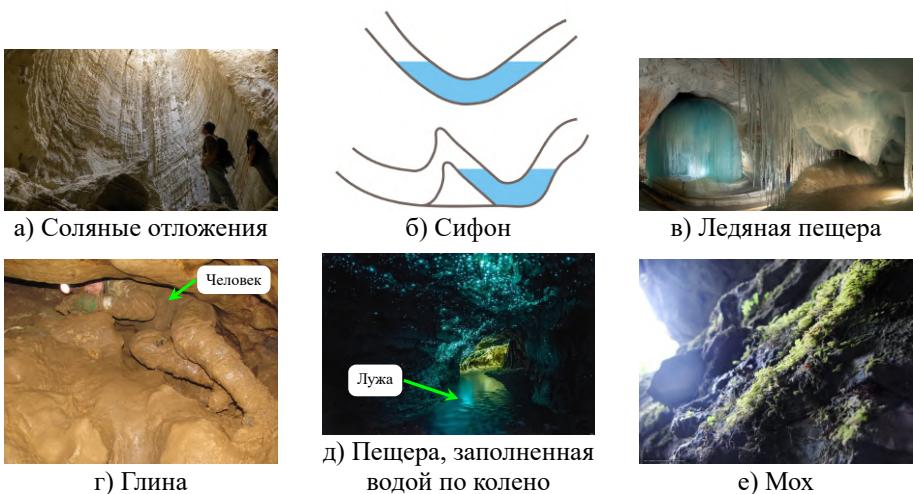


Рис. 1 — Препятствия, встречающиеся в пещерах

Эти препятствия могут встретиться человеком при исследовании или инспекции пещеры. Одно из преимуществ роботов — они могут работать в опасных средах без нахождения рядом человека. Таким образом использование роботов в пещерах нивелирует все опасности для человека.

Существуют различные типы движителей роботов. С препятствиями, представленными выше, лучше всего справляются многоногие шагающие роботы. Такие роботы могут проходить по сыпучим грунтам, каменистым грядам и преодолевать небольшие водные преграды.

Для полноценного функционирования любого мобильного робота необходимы сенсоры. Сенсоры мобильных роботов можно разделить на внешние и внутренние. Под внешними сенсорами подразумеваются устройства, элементы

которых не могут быть защищены от воздействия окружающей среды. Примерами таких сенсоров являются камеры, лидары, сонары и тому подобные устройства.

Внутренние сенсоры включают в себя датчики усилий, акселерометры, магнитометры, амперметры и так далее. Такие устройства предполагают взаимодействие с внешней средой посредством гравитационных или магнитных полей, или механических элементов, и могут быть механически защищены от неблагоприятного воздействия окружающей среды.

Большую опасность для мобильных роботов представляет тот факт, что характерные для пещеры условия могут вывести из строя сенсоры. К примеру грязь (рис. 1г) может закрыть обзор камере или лидару. Или водная гладь (рис. 1д) будет отражать лучи лазера лидара и искажать данные (рис. 2).



Рис. 2 — Примеры ситуаций, где навигация, основанная на камере или лидаре построит неправильную карту

Целью диссертационной работы является разработка метода построения карты местности с определением геометрических и физико-механических свойств опорной поверхности роботом с шагающими движителями снабженными тактильными датчиками.

Предлагаемое решение подходит для первичного исследования замкнутых труднодоступных пространств, где отсутствует освещение, присутствует обилие грязи, пыли, а также водных препятствий. Алгоритмы и концепты навигации данной системы могут быть использованы как резервная система навигации для других робототехнических систем, когда более точная — оптическая вышла из строя.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

1. Определение профиля опорной поверхности, на основе информации о точках её касания ногами робота и внутренних датчиков, характеризующих механическое состояние аппарата.
2. Определение физико-механических свойств опорной поверхности: жесткости, вязкости и пластичности, и выделение на их основе классов поверхностей на основе информации с датчиков силы, установленных на ногах и внутренних датчиков робота.
3. Исследование влияния на точность измерения усилий площади пятна контакта при нажатии на сенсор.

4. Изучение влияния геометрических параметров робота на точность и полноту физико-механических свойств опорной поверхности и профильную проходимость робота.

Объект исследования. Объектом исследования является класс многоногих шагающих роботов с цельным или сочленённым корпусом, и цикловыми движителями с одной степенью свободы, управляемые зависимо или независимо друг от друга.

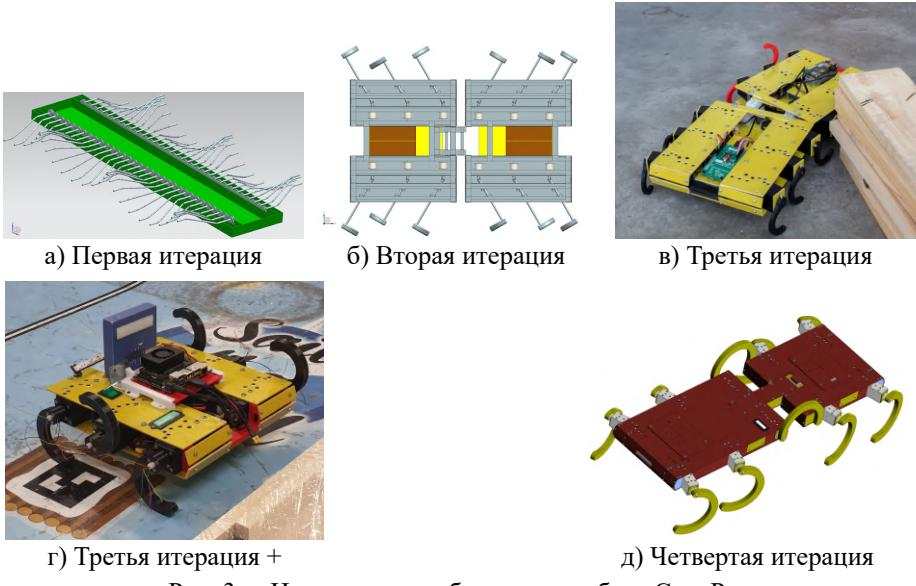


Рис. 3 — Итерации разработанного робота СтриРус

Были разработаны ряд компьютерных и две натурных модели робота такого класса под общим названием СтриРус (рис. 3), на базе которых проводились численные и натурные эксперименты. В процессе исследования модели уточнялись и изменялись. Так, первая модель (рис. 3а) имела цельный корпус и настраиваемое количество ног вплоть до нескольких десятков. По результатам исследования этой модели выяснилось, что большое количество ног является излишним. Поэтому во второй модели использовалось фиксированное количество – 12 ног, размещенных на двухсегментном корпусе, причём плоскости вращения ног расположены под углом к сагиттальной плоскости робота (рис. 3б). При изготовлении натурной модели робота была изменена форма ног и предусмотрены индивидуальные приводы для каждой ноги (рис. 3в). Часть натурных экспериментов проводилась с помощью робота с цельным корпусом (рис. 3г), а также на специально разработанном экспериментальном стенде. Последняя итерация модели, исправляющая выявленные недостатки предыдущих, имеет 10 увеличенных ног с независимым приводом, распределенных по двум сегментам корпуса

и возможностью изменения углов между корпусом и плоскостями вращения ног (рис. 3д).

Методологическая основа исследования. За основу были взяты методологии из теории по разработке робототехнических систем, теоретической механики, механизмов и машин, теории оптимизации.

Для экспериментального исследования применялось численное, натурное и стендовое моделирование.

Достоверность и обоснованность результатов. Достоверность результатов обеспечивается согласованностью с опубликованными результатами научных исследований других авторов, подтверждаются результатами компьютерного моделирования, натурными испытаниями. Результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на российских и международных научных конференциях, и получили положительный отзыв научной общественности.

Научная новизна:

1. Реализован метод построения карты местности, состоящий в определении геометрической формы поверхности с помощью тактильного чувствования, который позволяет решать задачу определения плана и профиля поверхности в условиях отсутствия видимости и при движении по поверхности, находящейся под водой. **Доказана** возможность построения карты местности с помощью тактильного чувствования, как в робототехническом симуляторе, так и с помощью натурного эксперимента.

2. Реализован метод определения физико-механических свойств опорной поверхности на основе тактильного чувствования. **Показана** возможность различать материалы с упругими, жесткими, пластичными свойствами.

3. **Установлено** то, что датчик силы, на основе полимерного материала, обеспечивает погрешность определения силы не более 10% при условии площади пятна контакта не менее 25% от размера датчика, что позволяет применять датчик такого типа для тактильного чувствования мобильного робота. **Предложена** методика роботизированного исследования датчика силы.

4. Предложен аддитивно-мультиплексивный критерий оптимизации кинематической схемы многоногих шагающих роботов с цикловыми одностепенными движителями, включающий в себя показатели проходимости и покрытия опорной поверхности. На основании которого определено оптимальное количество ног для циклового движителя с одной степенью свободы.

Сделан вывод об эффективности предложенных методов и методик, на основе результатов натурных испытаний.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Метод построения карты местности, состоящий в определении геометрической формы поверхности с помощью тактильного чувствования, который позволяет решать задачу определения плана и профиля поверхности в условиях отсутствия видимости и при движении по поверхности, находящейся под водой.

2. Метод определения физико-механических свойств опорной поверхности на основе тактильного чувствования, позволяющий различать материалы с упругими, жёсткими, пластичными свойствами.

3. Зависимость погрешности датчика силы на основе полимерного материала от площади пятна контакта относительно размеров датчика, применяемого для тактильного чувствования мобильного робота. Методика роботизированного исследования датчика силы.

4. Критерий оптимизации кинематической схемы многоногих шагающих роботов с цикловыми одностепенными движителями, включающий в себя показатели проходимости, покрытия опорной поверхности и её детализации. Определение на его основе габаритов и количества движителей шагающего робота.

Значимость работы. Реализация полученных результатов позволит разрабатывать мобильных шагающих роботов, способных перемещаться без использования оптических сенсоров или в условиях невозможности их использования, обеспечивая построение карты местности с определением типа и свойств опорной поверхности за счёт чувствования механизмов шагания робота.

Такие роботы могут быть востребованы для исследования естественных пещер, объектов антропогенного происхождения в условиях, когда локализация робота с помощь камер или лидаров невозможна из-за отсутствия света, наличия пыли, дыма или иных факторов, делающих невозможным применение оптических сенсорных систем.

Апробация работы. Основные положения диссертации доложены и обсуждены на конференциях:

- ICINCO 2017 — 14th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (Мадрид, Испания, 26-28 июля 2017);
- IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, ROBIO 2017 (Макао, Китай, 5-8 декабря 2017);
- Международная научно-практическая конференция «Прогресс транспортных средств и систем» (г. Волгоград, 9-11 октября 2018 г.);
- 23rd IEEE FRUCT Conference (Болонья, Италия, 13-16 ноября 2018);
- XXXI международная конференция молодых ученых и студентов МИКМУС-2019 (Москва, 4-6 декабря 2019 г.);
- Международная конференция «Зимняя Школа Робототехники в Сириусе — 2022» (Адлер, Россия, 25 января - 6 февраля 2022).

Личный вклад автора. Все научные результаты диссертации, выдвигаемые для защиты, получены автором лично. Автор самостоятельно проводил анализ литературы по теме, участвовал в обсуждении постановки цели диссертации, лично планировал и проводил компьютерные эксперименты и физические эксперименты, спроектировал и собрал экспериментальные установки. Автор лично получил все представленные в работе численные данные.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 18 печатных изданиях, 2 из которых изданы в журналах, рекомендованных

ВАК, 3 — в периодических научных журналах, индексируемых Web of Science и Scopus, зарегистрированы 8 программ для ЭВМ.

Диссертационная работа была выполнена при поддержке грантов:

– НТИ по поддержке Центра «Технологии компонентов робототехники и мехатроники» на базе Университета Иннополис по теме «Разработка роботизированных платформ для автономной подземной и наземной инспекции местности в условиях трудной проходимости и плохой видимости».

– РФФИ № 20-38-90265 по теме «Разработка метода очищения мобильного шагающего робота, перемещающегося в закрытом пространстве естественного происхождения».

Содержание работы

В первой главе представлены обзор и анализ областей, которые необходимы для решения поставленных научных задач.

Была проведена классификация машин, использующих ноги в качестве движителя. Изучив данный класс машин, были осмыслены габаритные и структурные особенности этих роботов. Для решения задачи определения геометрических и физико-механических свойств пройденной поверхности были изучены типы препятствий и размеры. Задача определения геометрических свойств объекта является частью Mapping из класса методов Simultaneous Localization and Mapping (SLAM). Была выявлена необходимость разработки модифицированного метода 2D триангуляции Делоне для вогнутых оболочек. Были рассмотрены различные алгоритмы и средства определения физико-механических свойств поверхности. Сделан вывод о необходимости использования датчика силы, установленного на ногу робота, а также собирать дополнительные данные об угловой скорости и моменте на моторе.

На основе проведенного анализа, разработана концепция робота (рис. 4). Оранжевым цветом выделены компоненты системы, которые представляют собой предмет исследования в рамках диссертационной работы. Голубым цветом выделены блоки, которые были использованы в работе как стандартные средства, без каких-либо существенных доработок.

Вторая глава показывает решения оптимизационных задач.

Первая задача: решить задачу оптимизации $F = f(x) \rightarrow \max$, где $f(x)$ — критерии: пройденная дистанция, длина корпуса, (x) — параметры: количество ног, сдвиг фазы между соседними ногами (рис. 5). Количество ног имеет прямую зависимость с длиной корпуса робота.

В основе метода лежит генетический алгоритм Open AI-EA. Метод работает следующим образом: генерируется множество особей, а также семейство территорий с одинаковой сложностью (рис. 6). За фиксированное время, с постоянной угловой скоростью на моторах, каждый робот проходит это семейство территорий и записываются данные. Делаются следующие предположения: есть только сухое трение между ногами и поверхностью, созданные поверхностью с



Легенда

- Синий квадрат: Стандартные средства, без доработок
- Оранжевый квадрат: Предмет исследования и разработки

Рис. 4 — Структурная схема разработанной системы

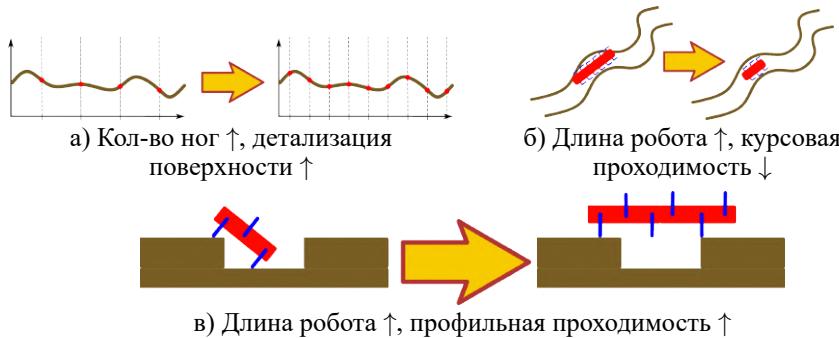


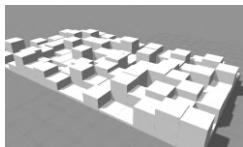
Рис. 5 — Критерии оптимизации конструкции робота

помощью одной функции и параметров имеют одинаковую сложность. Целевая функция (1).

$$F \rightarrow \max = \beta (\omega_1 \cdot \delta + \omega_2 \cdot L) + (1 - \beta) \delta^{\omega_1} (L)^{\omega_2} \quad (1)$$

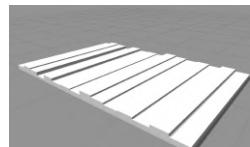
$$L = \frac{1}{(\gamma - 1) h_{\text{leg}} \sin(\alpha)} \quad (2)$$

Где β – адаптивный параметр, $\omega_{1,2} \in [0..1]$, $\omega_1 + \omega_2 = 1$ – весовые коэффициенты, δ – пройденный путь, L – упрощенная длина робота. Количество движителей по каждому из бортов обозначается через γ . Разность фаз между соседними движителями обозначается через α (рис. 7а).



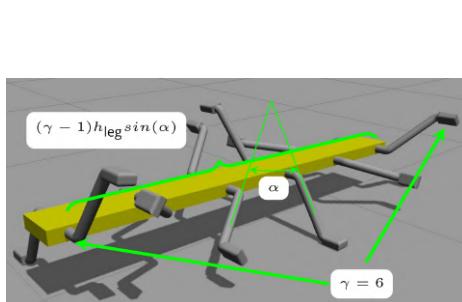
а) Т1: 3D-боксы с
равномерным
распределением высоты

б) Т2: 2D-полосы с
гауссовой
функциональной высотой

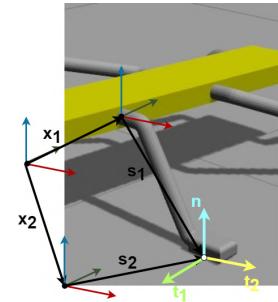


в) Т3: 2D-полосы с
распределением высоты
по гауссовой функции

Рис. 6 — Примеры сгенерированных территорий



а) Схема модели робота для генетического
алгоритма



б) Отображение переменных
для модели взаимодействия
опорной поверхности и ноги
робота

Рис. 7 — Пример модели робота

Описание математической модели. Робот представляет собой механическую систему, состоящую из твердых тел (3). Движение которых описывается дифференциальными уравнениями вида:

$$M \ddot{\vec{u}} = \vec{g} \quad (3)$$

$$M = \begin{bmatrix} M_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & M_n \end{bmatrix}, M_i = \begin{bmatrix} m_i E_{3 \times 3} & 0 \\ 0 & I_i \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\vec{u}_i^T = [\vec{v}_i^T \quad \vec{\omega}_i^T] \quad (5)$$

$$\vec{g}^T = [\cdots \vec{F}_i^T, \quad (\vec{\tau}_i - \vec{\omega}_i \times I_i \vec{\omega}_i)^T \cdots] \quad (6)$$

где, M_i — матрицы, содержащие массово-инерционные характеристики; m_i масса тела; I_i тензор инерции; \vec{u}_i вектор обобщённых скоростей; E — единичная матрица; \vec{g} вектор обобщённых сил; \vec{v}_i вектор линейной скорости; $\vec{\omega}_i$ — вектор угловой скорости; \vec{F}_i , $\vec{\tau}_i$ силы и моменты сил взаимодействия.

Тела, входящие в систему соединены между собой цилиндрическими шарнирами, которые описываются следующими связями и динамическими ограничениями:

чениями (7):

$$\phi(q_{j_1}, \dots, q_{j_k}, t) \geq 0 \quad (7)$$

$$\vec{q}_i^T = [\vec{x}_i^T \quad \vec{Q}_i^T] \quad (8)$$

$$\dot{\vec{q}}_i = \begin{bmatrix} E_{3 \times 3} & 0 \\ 0 & G(\vec{q}_i) \end{bmatrix} \vec{u}_i \quad (9)$$

$$\vec{g}_i = \tau_i^T \vec{z}_{i-1} - k_i \dot{\vec{q}}_i \quad (10)$$

где через ϕ обозначена функция связи; t время; q_j — вектор обобщенных координат, включающий в себя координаты центра масс \vec{x}_i и кватернион \vec{Q}_i , описывающий ориентацию тела в пространстве; через $G(\vec{q}_i)$ обозначена матрица, вид которой зависит от выбранной системы координат и способа задания ориентации тела; k — коэффициент вязкого трения в шарнире.

Контакт ног робота с опорной поверхностью (рис. 7б) описывается на базе модели сухого трения и выражается следующими уравнениями (11):

$$\phi_u(\vec{q}) \geq 0 \quad (11)$$

$$\phi_u(\vec{q}) = (\vec{x}_1 + \vec{s}_1 - \vec{x}_2 - \vec{s}_2) \cdot \vec{n} \quad (12)$$

$$\frac{d}{dt} \phi_u(\vec{q}) \approx [\vec{n}^T \quad (\vec{s}_1 \times \vec{n})^T \quad -\vec{n}^T \quad (-\vec{s}_2 \times \vec{n})^T] \begin{bmatrix} \vec{v}_1 \\ \vec{\omega}_1 \\ \vec{v}_2 \\ \vec{\omega}_2 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\begin{cases} \mu f_n \geq \sqrt{f_1^2 + f_2^2} \\ \|\vec{v}_t\| (\mu f_n - \sqrt{f_1^2 + f_2^2}) = 0 \\ \frac{\vec{f}_t}{\|\vec{f}_t\|} = -\frac{\vec{v}_t}{\|\vec{v}_t\|} \end{cases} \quad (14)$$

где, $\phi_u(\vec{q})$ — функция связи; μ — коэффициент трения между ногой и опорной поверхностью; $\vec{x}_{1,2}, \vec{s}_{1,2}$ — радиус-векторы и орты координатных осей $t_{1,2}$, \vec{n} показаны на рисунке (рис. 7б); $f_{1,2}$ — значения сил трения вдоль осей $t_{1,2}$.

Одним из основных результатов исследования, полученных при варьировании значений весовых коэффициентов ω является зависимость между количеством ног и пройденной дистанцией, которая показала наличие локального оптимума при количестве ног у робота в диапазоне от 8 до 14.

Вторая задача: разработать концепт корпуса робота для максимизации курсовой проходимости, без изменения длины ног робота.

На рисунке 8 представлена иллюстрация данной концепции: для того, чтобы робот двигался во всех направлениях, необходимо разделить ноги на группы, чтобы получилось 4 группы А-Д и сделать так, чтобы угол между корпусом робота и осью вала привода ноги не был равен 90 градусам.

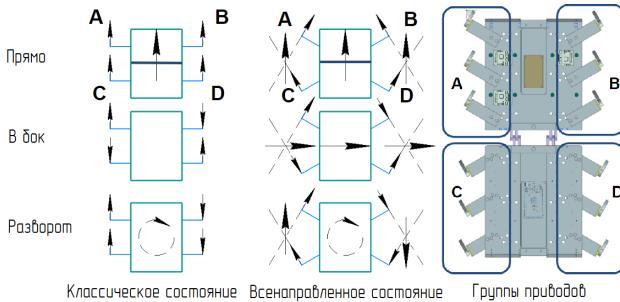


Рис. 8 — Векторное представление сил в классическом и всенаправленном вариантах робота

Стрелка в центре робота — результирующая всех сил. Если изменить угол оси привода ноги в соответствии с предлагаемой концепцией, к примеру при этапе проектирования, то возможно получить вектор результирующей силы, представленный на рис. 8 в центре. Для того, чтобы переместить корпус робота вправо, группы А и Д должны вращать ногу в одну сторону, а группы С и В — в противоположную.

Результатом главы стал метод, который позволяет оптимизировать конструкцию класса многоногих шагающих роботов с цельным или сочленённым корпусом, и цикловыми движителями с одной степенью свободы, управляемые зависимо или независимо друг от друга для решения задачи определения геометрических и физико-механических свойств пройденной поверхности.

Третья глава посвящена разработке и исследованию преобразователя силы на основе *Velostat*. Задача — измерить характеристики материала для случаев, когда площадь приложения силы меньше, чем площадь активной части сенсора.

Входными данными являются показания разработанного преобразователя и значение реально приложенной нагрузки. На выходе получается разница между нормальным значением с датчика и реальной нагрузкой.

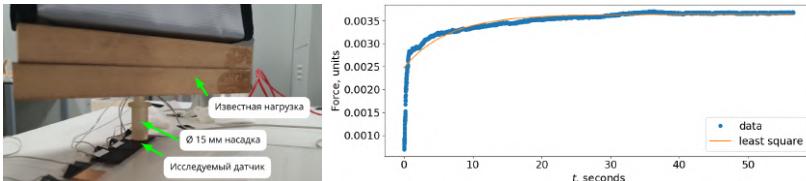
Для решения задачи проводилось два эксперимента. В **статическом эксперименте** решалась задача определения коэффициентов для математической модели преобразователя (15). В рамках эксперимента на сенсор прикладывалась известная нагрузка на 60 секунд (рис. 9а). Для решения задачи регрессии использовался робастный нелинейный алгоритм наименьших квадратов (рис. 9б).

$$V_{out} = V_0 + p[k_p + k_e(1 - e^{-\frac{(t-t_0)}{\tau_{res}}})](1 - e^{-\frac{A}{p}}) \quad (15)$$

$$k_p = A_1 e^{-A_2 p}; \tau_{res} = B_0 + B_1 e^{-\frac{p}{B_2}} \quad (16)$$

где, V_0 — начальное напряжение; p , A_i , B_i , τ_{res} , k_i — настраиваемые константы; t — текущее время; t_0 — время начала нажатия.

В **динамическом эксперименте** определялось влияние показаний сенсора в зависимости от положения площадки контакта. Для этого преобразователь



а) Стенд для эксперимента б) Результаты статического эксперимента

Рис. 9 — Статический эксперимент

представлен в виде матрицы 4×4 (рис. 10б). Манипулятор нажимает на преобразователь с одинаковым давлением на протяжении всех экспериментов в различные позиции на преобразователе, используя последовательно пять насадок. Роботизированный стенд, представлен на рисунке 10а.

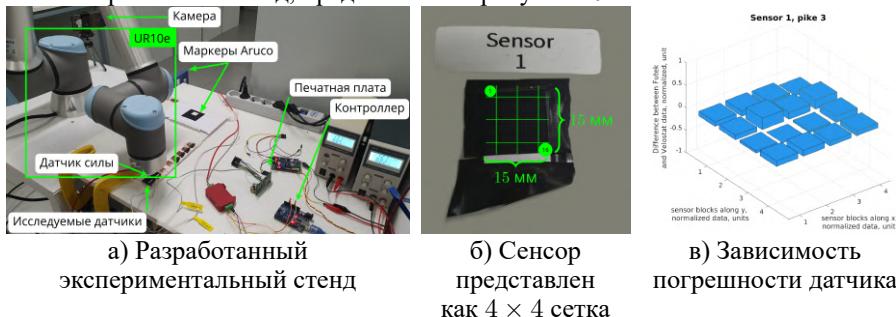


Рис. 10 — Представление места нажатия инструментом сенсора и сам инструмент

Результатом исследования является зависимость, что характеристики преобразователя удовлетворяют требованиям к системе тактильного восприятия шагающего робота, когда ожидаемый размер площади контакта превышает 25 процентов площади преобразователя.

Четвертая глава раскрывает детали определения профиля опорной поверхности, на основе информации о точках её касания ногами робота и внутренних датчиков, характеризующих механическое состояние аппарата. Вторая часть главы показывает определение с помощью робота физико-механических свойств опорной поверхности: жесткости, упругости и пластичности.

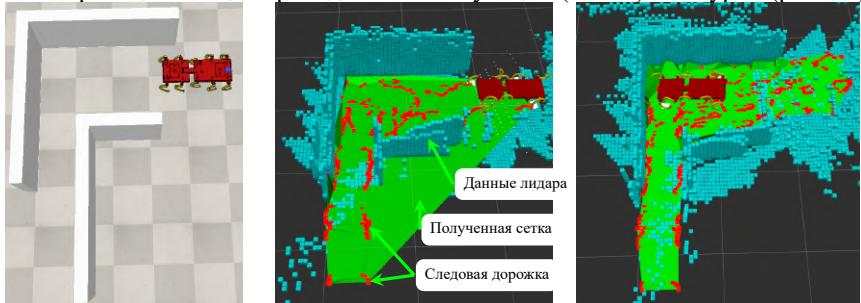
Первая задача: с помощью ощупывания роботом поверхности получить плотное облако точек и полигональную сетку.

Метод основан на триангуляции Делоне с использованием альфа формы. Идея решения: решив задачу локализации точки касания ногой робота опорной поверхности, получить облако точек следовой дорожки. Далее, необходимо очистить шумное облако точек и его усреднить с помощью Voxel Grid. Применив триангуляцию Делоне для вогнутых оболочек (рис. 11), получается полигональная сетка. На ее основе можно сгенерировать новые точки из полигональной сетки с нужным разрешением. Подразумевается, что расстояние между ногами

робота мало относительно размеров поверхности, следовательно, поверхность между ногами считается плоскостью.

Входными данными является следовая дорожка, в виде облака точек. Выходными — полигональная сетка и плотное облако точек. Допустимая точность: 0.1 м, оценки Cloud2Cloud и Cloud2Mesh.

Апробация метода проводилась в симуляции (Рис. 2) и натурно (рис. 12).

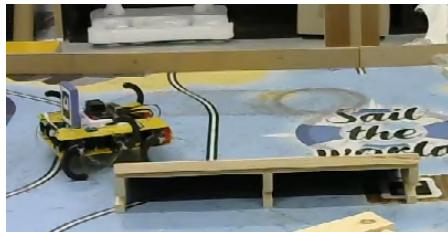


а) Пример поля

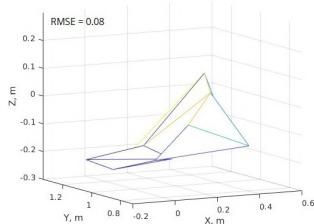
б) Выпуклая оболочка

в) Вогнутая оболочка

Рис. 11 — Объяснение необходимости модификации алгоритма Делоне



а) Робот проходит препятствие



б) Полученная полигональная сетка

Рис. 12 — Пример натурного эксперимента

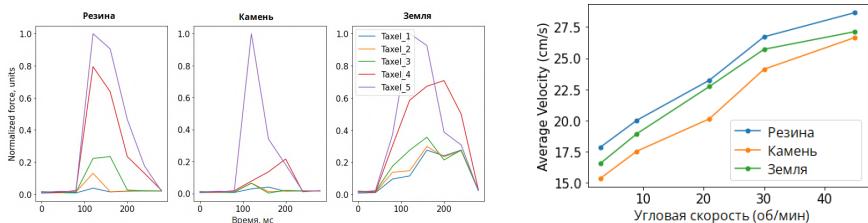
Как итог, среднеквадратичная ошибка для С2С метрики была в среднем равна 5 см. А для С2М 1 см. В натурном эксперименте по метрике С2С — 8 см.

Вторая задача это определение процентного соотношения твердых, упругих и пластичных свойств пройденной поверхности с помощью машинного обучения, метода опорных векторов (SVM).

Алгоритм решения следующий. Создается установка для обучения (рис. 14). Происходит обучение — робот ходит по различным типам поверхностей фиксированное количество касаний поверхности с постоянной угловой скоростью. Модель обучается на 80 % данных с помощью ядра на основе функции Пирсона VII (17). Тестирование происходит на оставшихся 20 %, используются метрики меткости, точности, полноты и F1-счета. Входными данными являются данные с внутренних датчиков сенсора (рис. 13).

$$K(x, y) = (1 + ((|x - y|^2)/\sigma^2)^\omega)^{(-1/\omega)} \quad (17)$$

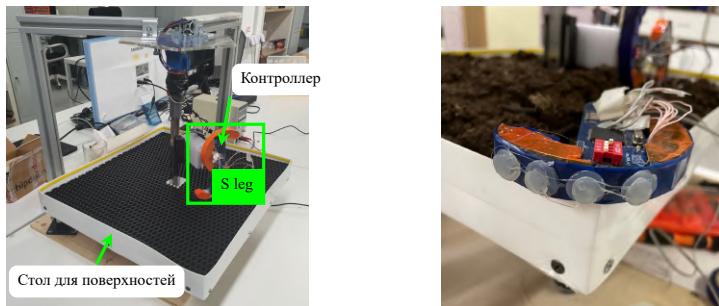
Где x, y — векторы во входном пространстве, $\|x - y\|$ обозначает евклидово расстояние между x и y , σ — масштабный параметр, определяющий «разброс» ядра, ω — параметр, влияющий на форму границы принятия решения.



а) Запись активных датчиков силы на разных поверхностях

б) Средняя линейная скорость робота

Рис. 13 — Пример некоторых входных данных



а) Общий вид экспериментальной установки б) Расположение сенсоров на ноге робота

Рис. 14 — Экспериментальная установка

Результат обучения представлен в виде таблицы (табл. 1).

Таблица 1 — Вероятность определения типа поверхности

		Предсказанный класс		
		Камень	Резина	Земля
Истинный класс	Камень	84.0%	2.56%	13.44%
	Резина	20.1%	67.8%	12.1%
	Земля	1.0%	18.9%	80.1%

Полученные результаты показывают, что в подавляющем большинстве случаев, удаётся корректно определить класс опорной поверхности. Ошибочные результаты классификации как правило не являются критичными, поскольку определение класса поверхности при движении робота осуществляется многократно в каждой точке касания. И, например, ошибка 20 % при определении класса означает, что в среднем в каждой пятой точке касания робот будет определять поверхность как более жёсткую, чем она есть на самом деле.

Разработанный метод определения физико-механических свойств поверхности показал достаточно высокий результат классификации поверхностей по трём классам, и может быть применим для более детальной классификации.

Заключение

Основной научный результат диссертации — метод построения карты местности с определением геометрических и физико-механических свойств опорной поверхности с помощью многоногого шагающего аппарата с тактильным ощущением без использования оптических сенсоров.

Полученное решение подходит для первичного исследования замкнутых труднодоступных пространств, где отсутствует освещение, имеется обилие грязи, пыли, а также водных препятствий. Алгоритмы и концепты навигации данной системы могут быть использованы как резервная система навигации для других робототехнических систем, когда главная система, которая является более точной, из-за природы использованных датчиков, вышла из строя.

При проведении исследований и разработок в диссертационной работе получены следующие результаты.

1. Был проведен обзор и анализ робототехнических систем и условия их применения. Проведена классификация машин, использующих ноги в качестве движителя. Наиболее полно были рассмотрены машины с циклическими движителями. В литературный обзор вошли роботы, которые могут быть использованы для исследования пещер. Была предложена их классификация.

Для понимания условий применений разрабатываемой робототехнической системы, были описаны параметры исследуемых пещер и их особенности.

Для разработки системы, важной частью которой является сенсорные устройства, был проведен глубокий их обзор и классификация. Так же был проведен литературный обзор алгоритмической части работы с сенсорами, к примеру обзор алгоритмов по триангуляции.

По результатам анализа была сформирована концепция разрабатываемой системы.

2. Разработан метод оптимизации конструкции многоногих шагающих роботов с цикловыми движителями с одной степенью свободы по критериям проходимости (длина робота), детализации (количество ног), пройденного пути.

Данный метод основан на применении генетического алгоритма OpenAI-ES, где были разработаны и реализованы операции скрещивания и мутации. Была разработана математическая модель робота, которая была реализована в GazeboSim. Для генерации семейства роботов было предложено геометрическое представление объекта. Так же разработан способ для генерирования местности, которую будет проходить экземпляр робота.

Помимо оптимизации конструкции по предложенным выше критериям, был разработан метод оптимизации конструкции робота для прохождения узких участков.

3. Разработан и исследован преобразователь силы на основе Velostat.

Одной из особенностей такого сенсора является то, что при одинаковой силе нажатия на сенсор, возникают различные результаты, в зависимости от места нажатия и площади нажатия. Для исследования данного феномена был разработан автоматизированный экспериментальный стенд.

По результатам поставленных экспериментов показано, что характеристики преобразователя удовлетворяют требованиям к системе тактильного восприятия шагающего робота, когда ожидаемый размер площади контакта превышает 25 процентов площади преобразователя.

4. Разработан метод определения геометрических свойств поверхности с помощью ощупывания. Метод основан на алгоритме вогнутой триангуляции Делоне с использованием альфа формы. Для первичной проверки гипотез была также разработана сцена в симуляторе CoppeliaSim.

Метод был проверен в натурном эксперименте на разработанной модели робота. По результатам экспериментов погрешность определения формы поверхности не превышала 8 см, что является приемлемым для практического применения.

5. Разработан метод определения физико-механических свойств опорной поверхности с помощью очувствления шагающего робота. Метод реализован на базе искусственной нейронной сети, и позволяет классифицировать различные типы поверхностей. Обучение нейронной сети проводилось на экспериментальных данных для трёх типов поверхности: с преобладанием твёрдых, упругих и пластичных свойств.

Публикации автора по теме диссертации

В изданиях из списка ВАК РФ

1. *Буличев О. В., Малолетов А. В.* Метод оптимизации количества ног шагающего робота на основе эволюционного алгоритма // Известия Волгоградского государственного технического университета. — 2022. — № 9. — С. 12–19.
2. *Буличев О. В., Полёткин К. В., Малолетов А. В.* Исследование характеристик датчика силы на основе материала "Velostat" для мобильного шагающего робота // Известия Волгоградского государственного технического университета. — 2022. — № 4. — С. 6–12.

В изданиях, входящих в международную базу цитирования Scopus

3. *Bulichev O., Klimchik A.* Concept Development Of Biomimetic Centipede Robot StriRus // 2018 23rd Conference of Open Innovations Association (FRUCT). — Bologna, 2018. — Nov. — P. 85–90.

4. *Bulichev O., Klimchik A., Mavridis N.* Optimization of Centipede Robot Body Designs through Evolutionary Algorithms and Multiple Rough Terrains Simulation // 2017 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (RO-BIO). — Macau, 2017. — Dec. — P. 290—295.
5. *Sokolov M., Bulichev O., Afanasyev I.* Analysis of ROS-based Visual and Li-dar Odometry for a Teleoperated Crawler-type Robot in Indoor Environment: // Proceedings of the 14th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics. — Madrid, Spain, 2017. — P. 316—321.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

6. Программа планирования траектории движения ног двенадцатиногого робота с использованием фреймворка ROS : пат. / О. В. Буличев. — Заявл. 27.11.2020, 2020664605 (Российская Федерация). — Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2020665488.
7. Программа позиционирования и стабилизации камеры для шагающего робота Стрирус : пат. / О. В. Буличев, Д. В. Бураков. — Заявл. 22.11.2019, 2019664222 (Российская Федерация). — Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2019665435.
8. Программа построения 3D-карты местности с помощью многоногого биомиметического шагающего робота с использованием фреймворка ROS : пат. / О. В. Буличев. — Заявл. 27.12.2021, 2021681297 (Российская Федерация). — Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2021681862.
9. Программа управления звеньями шагающего двенадцатиногого робота с помощью геймпада в робототехническом симуляторе Ignition : пат. / О. В. Буличев, А. А. Ахметшин. — Заявл. 27.11.2020, 2020664563 (Российская Федерация). — Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2020665643.
10. Программа управления экспериментальным стендом для автоматизации проверки датчиков очувствления : пат. / О. В. Буличев. — Заявл. 27.12.2021, 2021681288 (Российская Федерация). — Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2021681924.
11. Программа Обучения Робота Шаговым Движениям : пат. / О. В. Буличев ; А. некоммерческая организация высшего образования «Университет Иннополис» (RU). — Заявл. 28.08.2019, 2019618755 (Российская Федерация). — Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2019661399.
12. Программа Ориентации Шагающего Робота Стрирус в Условиях Плохой Видимости : пат. / О. В. Буличев, Д. В. Бураков. — Заявл. 21.11.2019, 2019664225 (Российская Федерация). — Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2019665262.

13. Программа Подбора Кинематических Параметров у Шагающих Роботов : пат. / О. В. Буличев. — Заявл. 07.08.2019, 2019618753 (Российская Федерация). — Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2019660557.

В прочих изданиях

14. *Буличев О. В.* Использование Robot Operating System (ROS) для планирования автономного перемещения мобильного робототехнического комплекса // Молодежный научно-технический вестник. — 2016. — № 10. — С. 7.
15. *Буличев О. В.* Обучение прямолинейному движению многоугольного робота на основе эволюционного алгоритма // В сборнике: Перспективное развитие науки, техники и технологий. Сборник научных статей 9-ой Международной научно-практической конференции. Ответственный редактор А.А. Горохов. — 2019. — С. 35—39.
16. *Буличев О. В.* Построение 3Д карты местности с помощью многоугольного биомиметического шагающего робота с использованием фреймворка ROS // Актуальные научные исследования в современном мире. — 2021. — № 11. — С. 374—377.
17. *Буличев О. В., Ахметшин А. А.* Прямолинейное движение всенаправленного многоугольного шагающего робота Стрирус // В сборнике: XXXI Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов по проблемам машиноведения (МИКМУС – 2019). Сборник трудов конференции. — 2020. — С. 449—452.
18. *Буличев О. В., Климчик А. С.* Стрирус: высокомобильный робот, вдохновленный насекомым мухоловкой // В книге: Прогресс транспортных средств и систем - 2018. Материалы международной научно-практической конференции. Под редакцией И.А. Каляева, Ф.Л. Черноусько, В.М. Приходько. — 2018. — С. 136—138.