

АВТОНОМНАЯ НЕКОММЕРЧЕСКАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ВЫСШЕГО  
ОБРАЗОВАНИЯ «УНИВЕРСИТЕТ ИННОПОЛИС»  
(АНО ВО «Университет Иннополис»)

Рег. №AAAA-A20-120102990021-3

УТВЕРЖДАЮ

Директор

К.В. Семенихин

«\_\_\_» 2023 г.

МП

ОТЧЕТ О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

по теме:

Разработка метода очувствления мобильного шагающего робота,  
перемещающегося в закрытом пространстве естественного происхождения  
(итоговый)

В рамках выполнения  
работ по договору с РФФИ  
№20-38-90265\20 от 28.08.2020

Руководитель НИР

Профессор \_\_\_\_\_ А.В. Малолетов

«\_\_\_» 2023 г.

Иннополис 2023

# РЕФЕРАТ

Отчет на 32 стр.

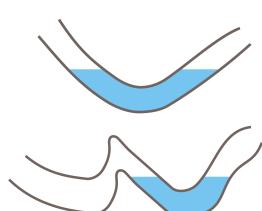
ШАГАЮЩИЙ РОБОТ, КАРСТОВЫЕ ПЕЩЕРЫ, ТАКТИЛЬНЫЕ СЕНСОРЫ, ОЧУВСТВЛЕНИЕ, ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТИПА ТЕРРИТОРИИ, SLAM

**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).



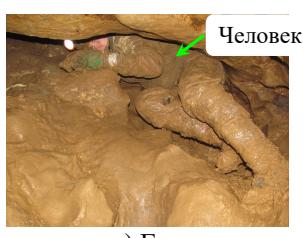
а) Соляные отложения



б) Сифон



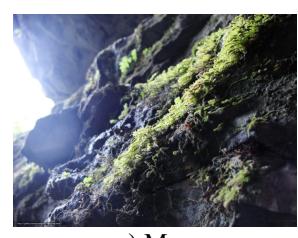
в) Ледяная пещера



г) Глина



д) Пещера, заполненная водой по колено



е) Мох

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).

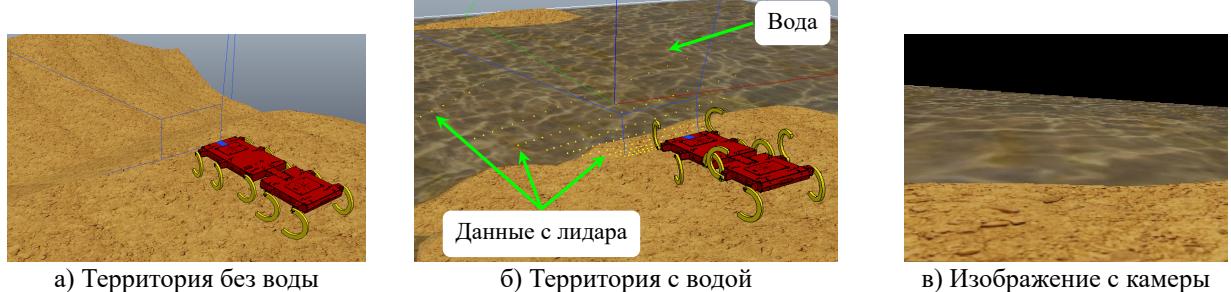


Рис. 2 — Примеры ситуаций, где навигация, основанная на камере или лидаре построит неправильную карту

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 так же 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.

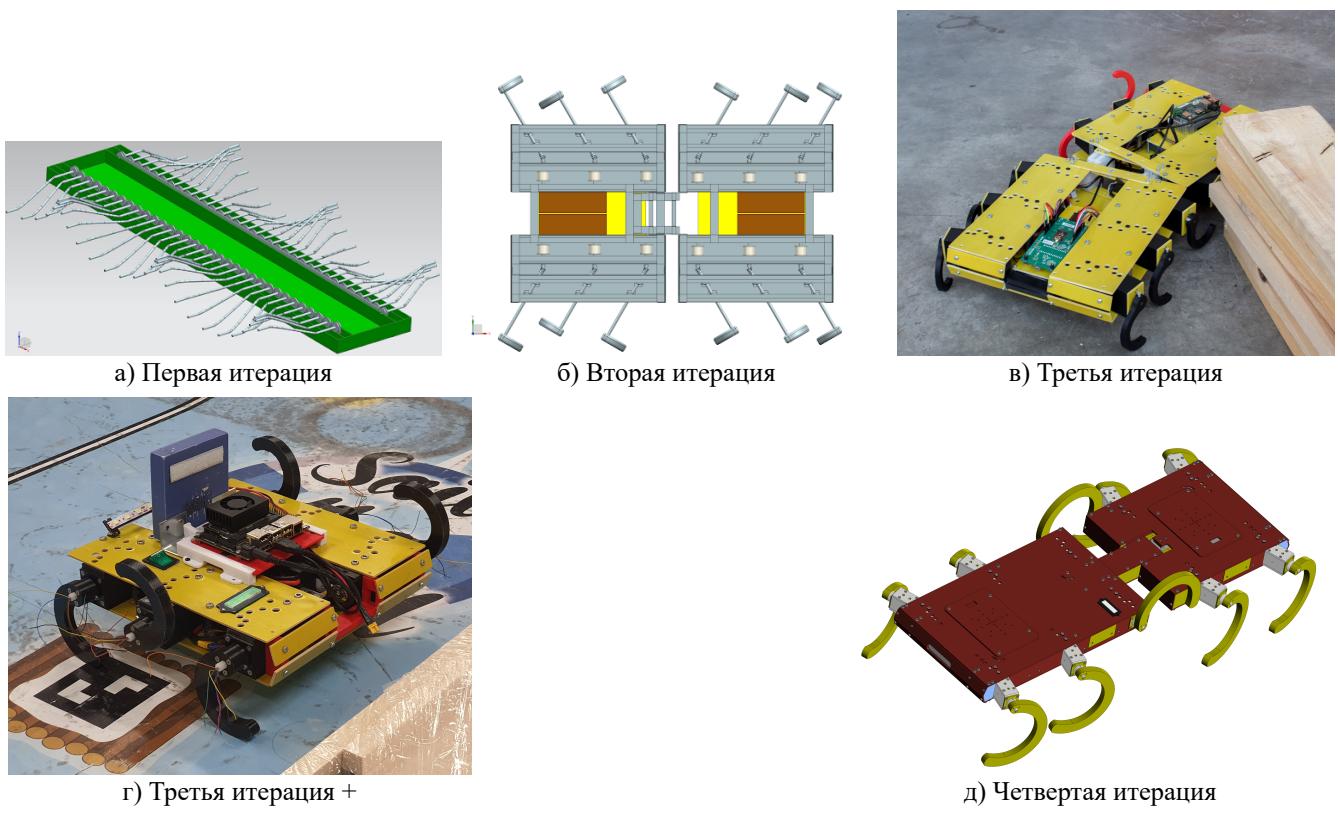


Рис. 3 – Итерации разработанного робота СтриРус

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, распределённых 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 очуствления, 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 очуствления, как в робототехническом симуляторе, так и с помощью натурного эксперимента.

2. Реализован метод определения физико-механических свойств опорной поверхности на основе тактильного очуствления. **Показана** возможность различать материалы с упругими, жёсткими, 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 очуствления мобильного робота. **Предложена** методика роботизированного исследования датчика силы.

4. Предложен аддитивно-мультипликативный 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 очувствления, 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 очувствления, 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 очувствления 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 очувствления механизмов шагания робота.

Такие роботы могут быть востребованы для исследования естественных пещер, объектов антропогенного происхождения в условиях, когда локализация ро-

бота 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 роботизиро-

ванных платформ для автономной подземной и наземной инспекции местности в условиях трудной проходимости и плохой видимости».

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

## **Оглавление**

<b>ВВЕДЕНИЕ</b>	<b>2</b>
<b>Оглавление</b>	<b>9</b>
<b>Обзор и анализ робототехнических систем, условия их применения</b>	<b>9</b>
<b>Оптимизация конструкции робота</b>	<b>11</b>
<b>Разработка и исследование преобразователя силы на основе Velostat</b>	<b>18</b>
<b>Разработка метода тактильного очувствления</b>	<b>21</b>
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b>	<b>26</b>

## **Содержание работы**

Основанием для проведения работ является заключенный с Федеральным государственным бюджетным учреждением «Российский фонд фундаментальных исследований» договор №20-38-90265\20 от 28.08.2020 г. о предоставлении гранта победителю конкурса и реализации научного проекта «Разработка метода очувствления мобильного шагающего робота, перемещающегося в закрытом пространстве естественного происхождения».

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

Была проведена классификация машин, использующих ноги в качестве движителя. По результатам классификации объектом исследования является многоногая шагающая машина с движителями циклического действия. Изучив данный класс машин были осмыслены габаритные и структурные особенности этих роботов.

Так как основным местом применения разработанных методов предполагается исследование пещер роботами, то были рассмотрены типы роботов и роботехнических систем, которые могут использоваться для изучения поверхности пещер.

Для решения задачи определения геометрических и физико-механических свойств пройденной поверхности необходимо понимать в каких условиях будет использоваться робот: типы препятствий и размеры. В пещерах встречаются следующие типы поверхностей: твердые породы, прочные (мрамор), мягкие (мел, известняк); сыпучие грунты (песок); водные преграды (лужи, бассейны); скользкие и упругие поверхности (мох, плесень); пластиначатые (земля). С точки зрения механики все эти типы поверхностей могут характеризоваться их свойствами упругости, вязкости и пластичности. Длины многих пещер измеряются километрами, а их габариты очень сильно варьируются от нескольких сантиметров, до многих километров в ширину. Однако наибольший интерес в контексте исследования представляют проходы шириной в несколько десятков сантиметров, потенциально доступные, но опасные для человека.

Задача определения геометрических свойств объекта является частью Mapping из класса методов Simultaneous Localization and Mapping (SLAM). По результатам анализа известных методов сделан вывод, что задача локализации может быть решена с помощью маяков или ToF камеры, но для построения карты требуется разработка собственного метода.

Проведен обзор алгоритмов триангуляции, так как данный метод лёг в основу определения геометрических свойств объекта. 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.

Для решения задачи оптимизации количества ног робота, выявлена необходимость генерировать семейства поверхностей с одинаковой сложностью. Поиск различных вариантов привел к выбору подхода «Получение искусственных поверхностей на основе параметров генерации», который был модифицирован автором.

На основе литературного обзора было выявлено, что предложенные решения для определения геометрических и физико-механических свойств не встречается в научных публикациях российских и зарубежных авторов, следовательно обладают признаками новизны.

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** раскрывает решения трех оптимизационных задач, связанных с оптимизацией конструкции робота.

**Первая задача:** оптимизировать количество ног у объекта исследования на основе критериев (рис. 5).

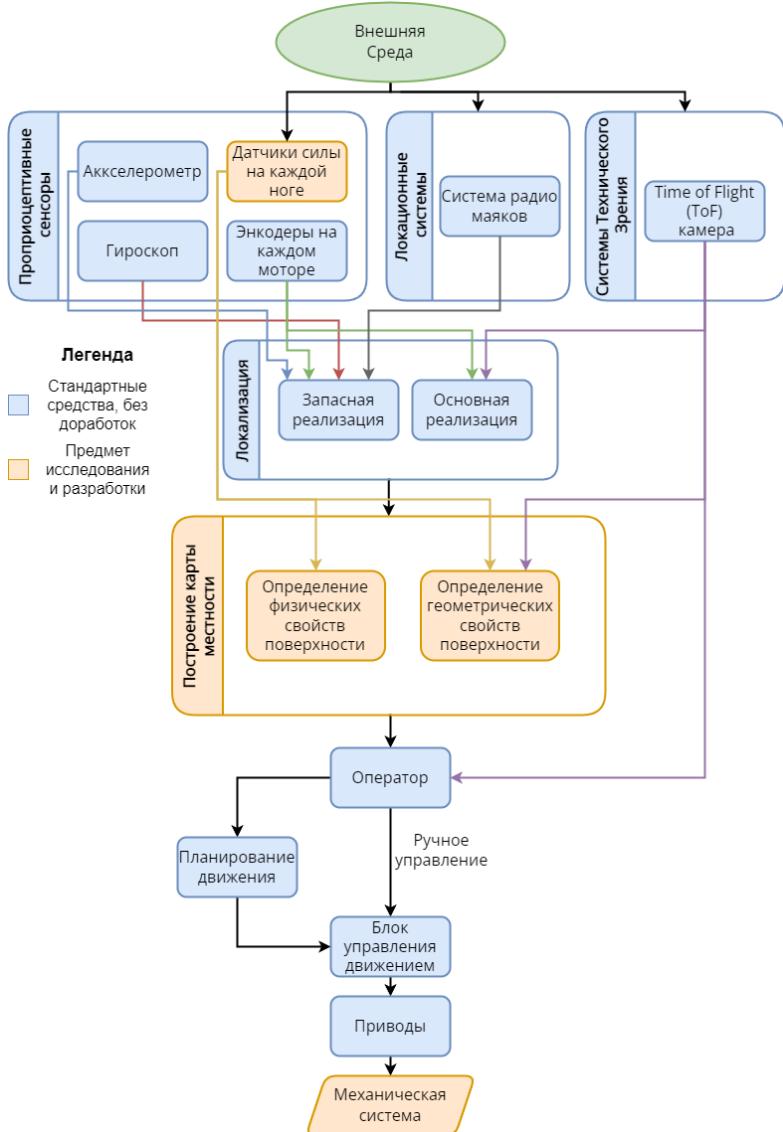


Рис. 4 — Структурная схема разработанной системы

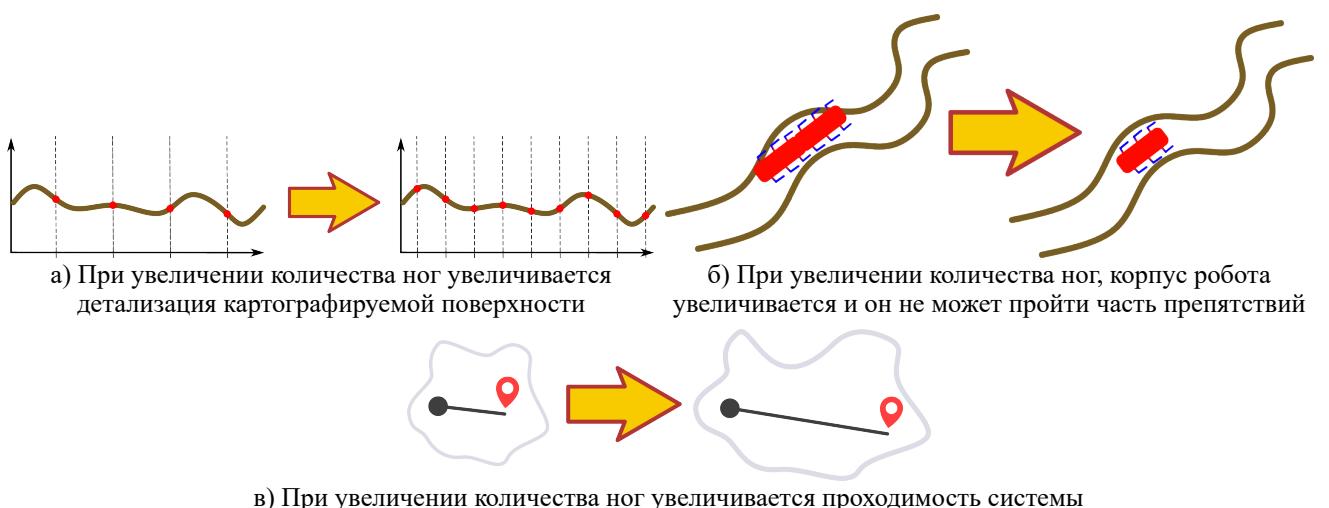


Рис. 5 — Критерии оптимизации конструкции робота

Чем больше ног имеет робот, тем более детально он может «ощупать» поверхность за один проход. В тоже время, при достаточно большом количестве ног

дальнейшее увеличение их количества уже не будет давать значительного увеличения получаемой информации. С другой стороны, увеличение количества ног означает удлинение корпуса робота, что ухудшает его проходимость в узких проходах. Увеличение количества ног и связанное с этим удлинение корпуса также способствуют увеличению профильной проходимости робота, поскольку длинный робот с большим количеством ног легче преодолевает препятствия типа ям или траншей. Проходимость оценивается по длине пройденного роботом пути за заданное время при перемещении по заданной поверхности. Таким образом, сформулированы три критерия: детализация построенной карты, проходимость в узких проходах и профильная проходимость робота, которые зависят от количества ног робота. Критерии находятся в противоречии друг с другом, следовательно формулируется задача многокритериальной оптимизации.

Для исследования использовалась модель робота с варьируемым количеством ног (рис. 3а), а значения критериев определялись по результатам численного моделирования при перемещении такого робота по поверхности случайного профиля.

Исследование проводилось на базе генетического алгоритма. Для каждого поколения генерируется семейство территорий (делается предположение, что территория, сгенерированная на основе одинаковых параметров является одинаково сложной (рис. 6)). Индивид запускается на фиксированное время на данную территорию, приводы включаются с постоянной угловой скоростью. В зависимости от параметров робота и конкретной территории, робот за заданное время преодолевает различную дистанцию. Результаты пройденной дистанции и параметры робота записываются и участвуют в функции оптимизации генетического алгоритма.

Геометрическая модель робота представлена в виде трехмерного параллелепипеда. Количество движителей по каждому из бортов обозначается через  $\gamma$ . Разность фаз между соседними движителями обозначается через  $\alpha$  (рис. 7).

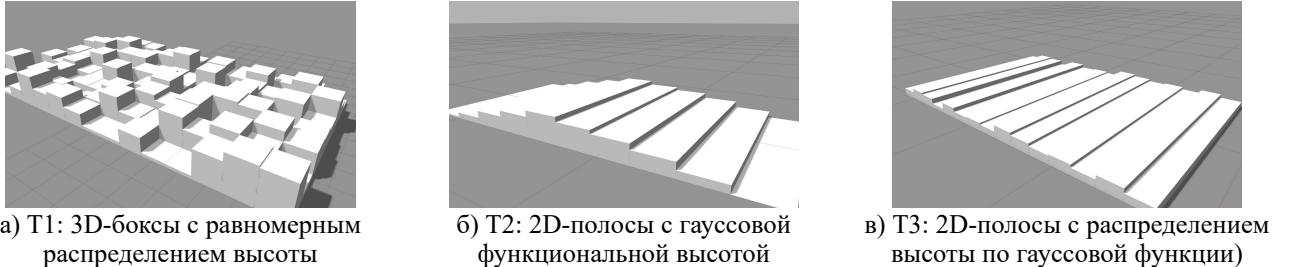


Рис. 6 — Примеры сгенерированных территорий

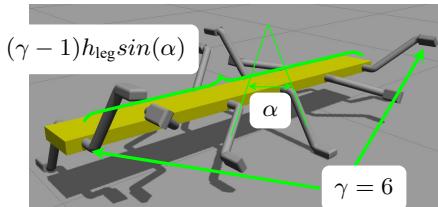


Рис. 7 — Схема модели робота для генетического алгоритма

Для решения задачи оптимизации нужно разработать целевую функцию. Поскольку количество ног и длина корпуса имеют прямую зависимость, то задачу формализована следующим образом. Необходимо максимизировать дистанцию, пройденную за фиксированное время, и минимизировать длину робота (1). Параметрами индивида являлись  $\gamma$  и  $\alpha$ . Функция оптимизации осуществлялась с помощью мультипликативно-аддитивной свертки.

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

$$+ (1 - \beta) \delta^{\omega_1} (L)^{\omega_2}$$

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

где  $\delta$  пройденная дистанция,  $L$  — упрощенное представление длины тела,  $\beta$  адаптивный параметр,  $\omega_{1,2} \in [0..1]$  весовые коэффициенты.

*Описание математической модели.* Здесь и далее движение робота моделировалось с помощью следующей динамической модели. Робот представляет собой механическую систему, состоящую из твердых тел (3). Движение которых описывается дифференциальными уравнениями вида:

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

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

$$\vec{u}_i^T = \begin{bmatrix} \vec{v}_i^T & \vec{\omega}_i^T \end{bmatrix} \quad (5)$$

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

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 (7):

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

$$\vec{q}_i^T = \begin{bmatrix} \vec{x}_i^T & \vec{Q}_i^T \end{bmatrix} \quad (8)$$

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

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

где через  $\phi$  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. 8) описывается на базе модели сухого трения и выражается следующими уравнениями (11):

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

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

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

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

где,  $\phi_u(\vec{q})$  — функция связи;  $\mu$  — коэффициент трения между ногой и опорной поверхностью;  $\vec{x}_{1,2}, \vec{s}_{1,2}$  — радиус-векторы и орты координатных осей  $\vec{t}_{1,2}, \vec{n}$  показаны на рисунке (рис. 8);  $f_{1,2}$  — значения сил трения вдоль осей  $t_{1,2}$  соответственно.

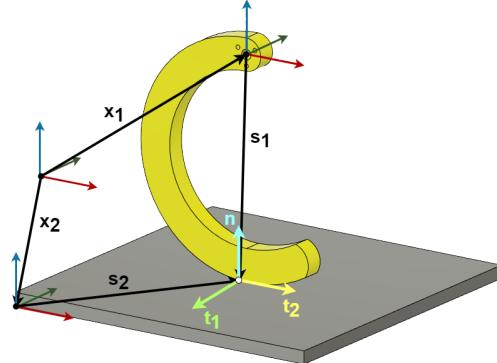


Рис. 8 — Отображение переменных для модели взаимодействия опорной поверхности и ноги робота

Численные эксперименты выполнялись в симуляторе Gazebo. В качестве примера видеозапись одного из экспериментов можно посмотреть по ссылке в

QR-коде



Одним из основных результатов исследования, полученных при варьировании значений весовых коэффициентов  $\omega$  является зависимость между количеством ног и пройденной дистанцией (рис. 9), которая показала наличие локально-го оптимума при количестве ног у робота в диапазоне от 8 до 14.

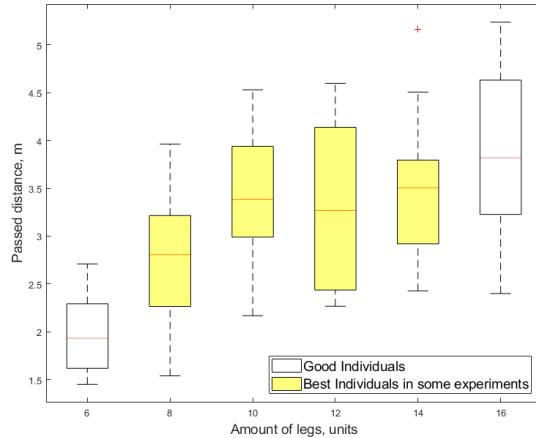


Рис. 9 — Зависимость между количеством ног и пройденной дистанцией

**Вторая задача:** найти оптимальную разность фаз между соседними ногами робота при прямолинейном движении, чтобы средний клиренс был максимально возможным, а колебания корпуса робота — минимальны. У робота, для которого решалась данная задача ноги двигались синхронно, но в начальный момент времени была возможность выставить произвольную фазу на каждой ноге и она будет сохраняться.

Задача целевой функции — максимизировать вертикальную координату  $Z$  робота и минимизировать среднеквадратичное значение ( $RMS$ ) и среднее стандартное отклонение ( $STD$ ) углов тангажа и крена. Целевая функция учитывает направление движения.

Целевая функция выглядит следующим образом:

$$F = \sum_{i=1}^4 \omega_i \cdot \left( \frac{1}{\omega_{z1} Z_{rms}^i - \omega_{z2} Z_{std}^i} + (\omega_{p1} \alpha_{rms}^i + \omega_{p2} \alpha_{std}^i) + (\omega_{r1} \beta_{rms}^i + \omega_{r2} \beta_{std}^i) \right) \rightarrow min \quad (15)$$

где  $i = \{1,2,3,4\}$  индекс, который определяет направление движения: 1 — вперед, 2 — влево, 3 — вправо, 4 — вращение;  $\alpha, \beta$  значения ориентации по крену и тангажу;  $\omega_i$  весовой коэффициент для направления движения.

Решение задачи оптимизации проводилось с помощью метода полного перебора. Результатом является оптимальная разность фаз, близкая к 120 градусам.

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

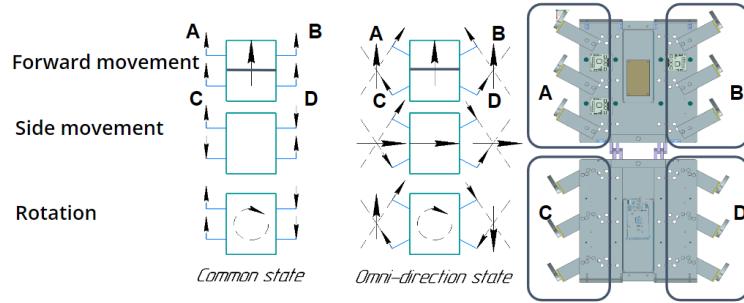


Рис. 10 — Векторное представление сил в классическом и всенаправленном вариантах робота

На рисунке 10 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.

Стрелка в центре робота — результирующая всех сил. Если изменить угол оси привода ноги в соответствии с предлагаемой концепцией, к примеру при этапе проектирования или сделать возможность ее изменять во время движения, то возможно получить вектор результирующей силы, представленный на рис. 10 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.

Возможности, полученные с помощью оптимизации конструкции робота можно посмотреть по ссылке в QR-коде



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 собственного изготовления.

Для определения геометрических и физико-механических свойств поверхности было решено использовать датчик силы на ноге робота. Рассмотрев различные варианты, по причине отличного соотношения цены и получаемого результата, необходимо использовать пьзорезистивный тип датчика, основанный на

материале Velostat (рис. 11а). Он является промежуточным слоем (рис. 11б). Электрическая схема (рис. 11в).



Рис. 11 — Примеры использования Velostat

При исследовании преобразователя силы на основе Velostat, было замечено, что площадь нажатия влияет на показания преобразователя, поэтому возникла необходимость исследовать характеристики материала для случаев, когда площадь приложения силы меньше чем площадь активной части сенсора.

Исследования сенсора выполнялись на специально разработанном для этого стенде. Требования: необходимость контролировать силу нажатия и обеспечить повторяемость эксперимента как по величине, так и по расположению площадки контакта инструмента и исследуемого преобразователя силы.

Разработанный стенд, представлен на рисунке 12.

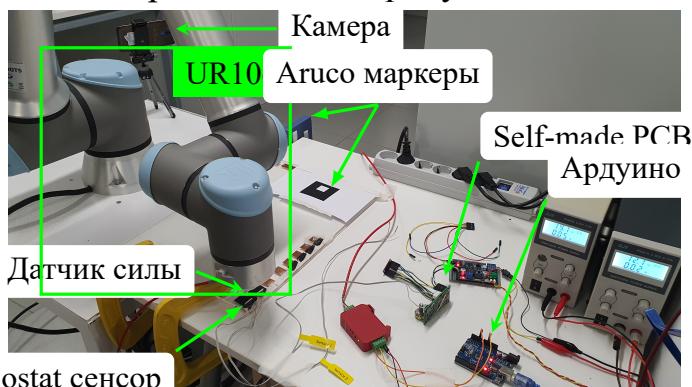
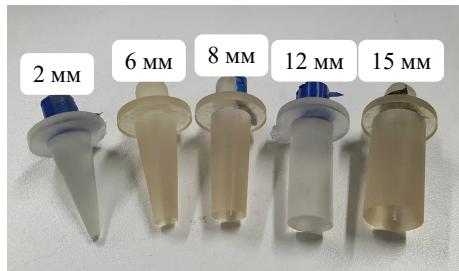


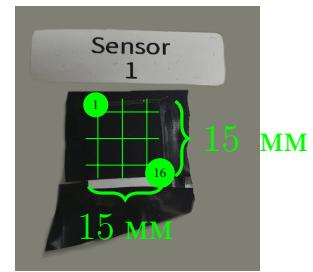
Рис. 12 — Разработанный экспериментальный стенд

Для касания только части объекта исследования были разработаны различные насадки. Минимальный размер препятствия, которого может коснуться робот, был принят равным 2 мм. Длина ребра датчика – 15 мм (рис. 13а).

Для контроля силы нажатия манипулятором сенсора, было реализовано импедансное управления по оси, перпендикулярной плоскости датчика.



а) Насадки для нажатия на сенсор



б) Сенсор представлен как  $4 \times 4$  сетка

Рис. 13 — Представление места нажатия инструментом сенсора и сам инструмент

Было проведено два эксперимента: статический и динамический В **статическом** решалась задача определения коэффициентов для математической модели преобразователя (калибровка датчика). В рамках эксперимента на сенсор прикладывалась известная нагрузка на 60 секунд.

Для калибровки использовалась формула (16). Из-за гистерезиса необходимо учитывать время нажатия на объект, так как показания сенсора меняются со временем.

$$V_{out} = V_0 + p[k_p + k_e(1 - e^{-\frac{(t-t_0)}{\tau_{res}}})](1 - e^{-\frac{A}{p}}) \quad (16)$$

$$k_p = A_1 e^{-A_2 p}; \tau_{res} = B_0 + B_1 e^{-\frac{p}{B_2}} \quad (17)$$

где,  $V_0$ - начальное напряжение;  $p$ ,  $A_i$ ,  $B_i$ ,  $\tau_{res}$ ,  $k_i$  - настраиваемые константы;  $t$  - текущее время;  $t_0$  - время начала нажатия. Для решения задачи регрессии использовался робастный нелинейный алгоритм наименьших квадратов (рис. 14).

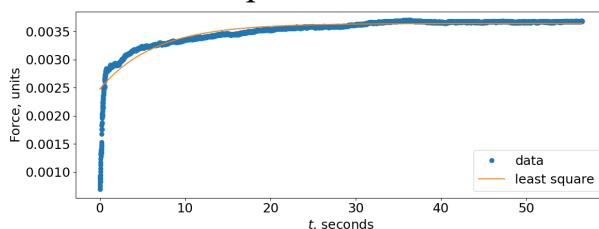


Рис. 14 — Результаты статического эксперимента

**Динамический эксперимент.** Цель — определить влияние показаний сенсора в зависимости от положения площадки контакта. Для этого преобразователь представлен в виде матрицы  $4 \times 4$  (рис. 13б). Манипулятор нажимает на преобразователь с одинаковым давлением на протяжении всех экспериментов в различные позиции на преобразователе, используя последовательно пять насадок (рис. 13а).

Результаты распределения ошибок по площади сенсора при взаимодействии с насадками разных размеров (рис. 15). Ошибки определялись как разница между нормализованными показаниями калиброванного сенсора силы Futek и исследуемого преобразователя на базе Velostat.

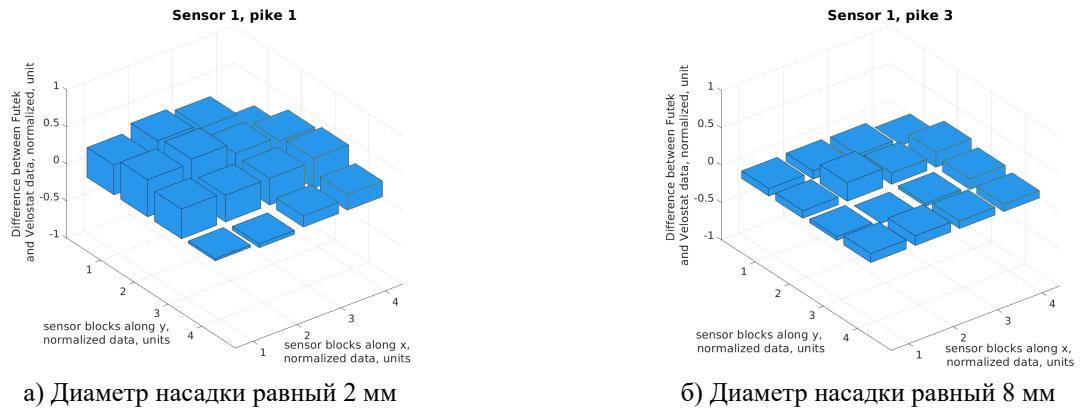


Рис. 15 — Динамический эксперимент

По результатам исследований показано, 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:** имеется поверхность. Каждому набору координат  $x, y$  соответствует одно и только одно значение координаты  $z$ . Необходимо с помощью ощупывания роботом поверхности получить плотное облако точек и полигональную сетку.

Сделано предположение, что расстояние между ногами робота мало относительно размеров поверхности, следовательно, поверхность между ногами считается плоскостью.

Для получения облака точек касаний опорных поверхностей, относительно глобальной системы координат, необходима трансформация систем координат от

глобальной, до конкретного сенсора на ноге. Этому соответствует прямая задача кинематики (рис. 16), (18) и задачи локализации.

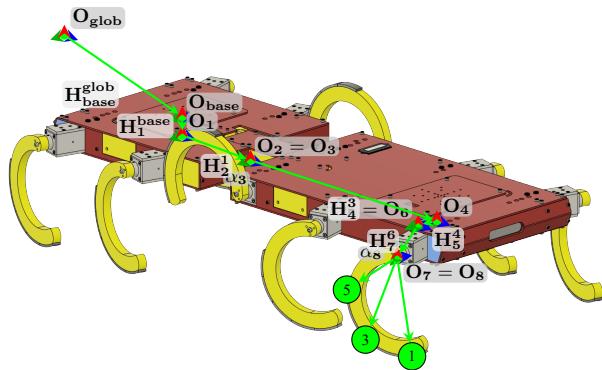


Рис. 16 — Кинематическая схема для определения точки касания опорной поверхности роботом

$$H_{leg}^{glob} = H(x_{glob}, y_{glob}, z_{glob}, \alpha_{glob}, \beta_{glob}, \gamma_{glob}) T_z(l_1)$$

$$T_x(l_2) R_y(\alpha_3) T_x(l_4) T_y(l_5) R_z(-15^\circ) T_y(l_7) R_y(\alpha_8) \quad (18)$$

Где каждая матрица представляет собой матрицу однородного преобразования, через  $R_i$  обозначены однородные матрицы поворота, относительно соответствующей оси,  $T_i$  — однородную матрицу перемещения.

Для получения плотного облака точек необходимо очистить оригинальное облако точек от шумов и усреднить близлежащие точки с помощью Voxel grid. Потом из него генерируется полигональная сетка с помощью 2D Триангуляции Делоне (рис. 17) (вогнутая оболочка (рис. 18)). На ее основе получается необходимое плотное облако точек.

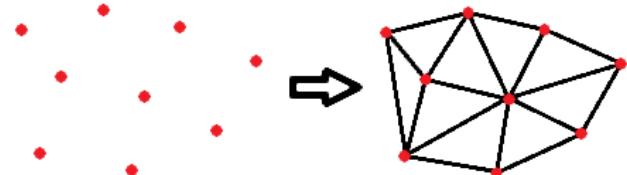


Рис. 17 — 2D Триангуляция Делоне (выпуклая оболочка)

Модификация триангуляции Делоне нужна, так как выпуклой оболочке (рис. 18б) алгоритм построил карту местности там, где робот не ходил. При использовании вогнутой оболочки (рис. 18в) данная проблема не наблюдается.

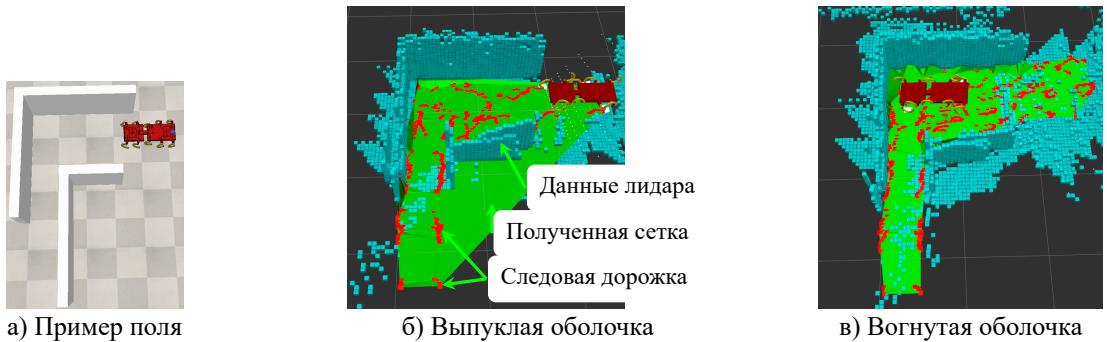


Рис. 18 — Объяснение необходимости модификации алгоритма Делоне

Проверка алгоритма в симуляции (Рис. 2), натурно (рис. 19).

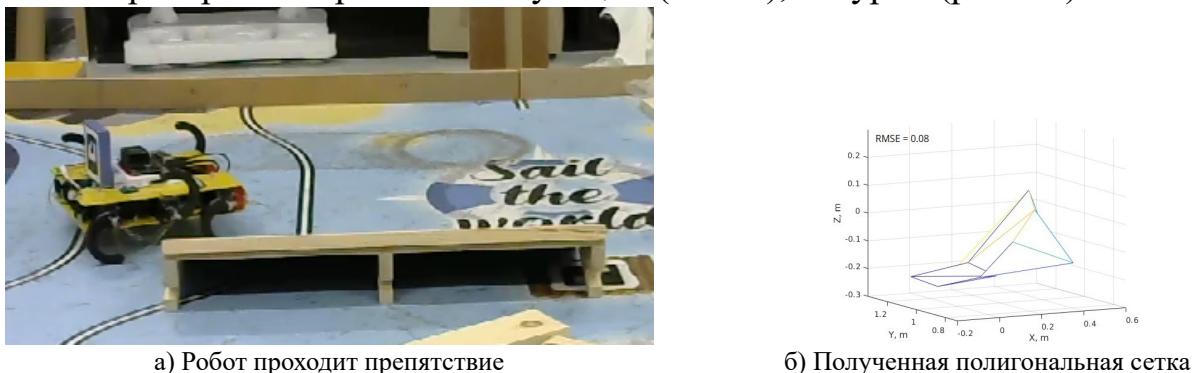
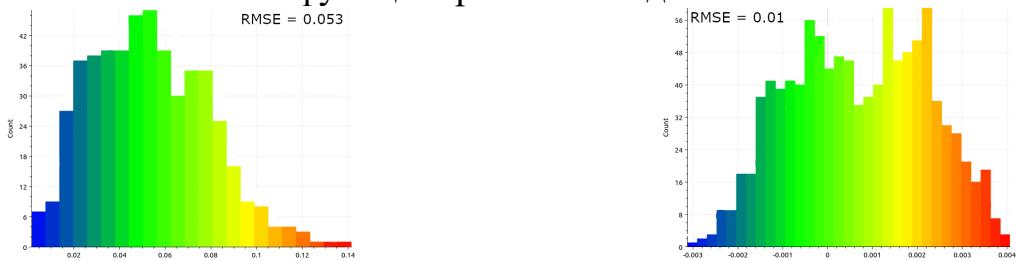


Рис. 19 — Пример натурного эксперимента

Для оценки точности полученных данных использовались метрики Cloud to Cloud (C2C) (19) и Cloud to Mesh (C2M) (рис. 20).

$$d_H(X, Y) = \sup_{m \in M} \{ |\text{dist}_X(m) - \text{dist}_Y(m)| \} \quad (19)$$

Где  $X, Y$  непустые подмножества метрического пространства  $M$ ;  $\text{dist}_X: M \rightarrow \mathbb{R}$   $\text{dist}_X: M \rightarrow \mathbb{R}$  обозначает функцию расстояния до множества  $X$ .



а) Метрика C2C: гистограмма ошибок (абсолютное расстояние от точки до ближайшей реферальной точки) б) Метрика C2M: Гистограмма ошибок (относительное расстояние от точки до ближайшей реферальной точки)

Рис. 20 — Метрики оценки точности полученной карты

Как итог, среднеквадратичная ошибка для C2C метрики была в среднем равна 5 см. А для C2M 1 см. В натурном эксперименте по метрике C2C — 8 см.

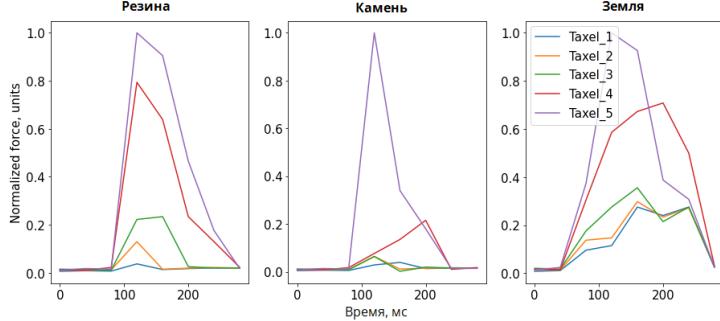
**Вторая задача** это определение физико-механических свойств опорной поверхности. С точки зрения механики свойства поверхности сводятся к показателям упругости, вязкости и пластичности. Однако непосредственное измерение этих показателей затруднительно. В исследовании решалась задача классификации опорной поверхности с помощью искусственной нейронной сети. В качестве эталона жёсткой поверхности использовались крупные камни, эталоном упругой поверхности была принята резина, а эталоном поверхности с явно выраженными свойствами пластичности выступила песчаная почва.

При движении робота по поверхности собираются данные с датчиков силы и с моторов. На основе предварительного обучения с помощью метода опорных векторов (SVM), данные обрабатываются и классифицируются.

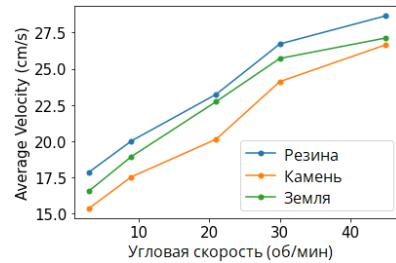
Вектор с входными данными представлен следующим образом:

- Элемент(1) — Частота движения ног
- (2) — Пиковая амплитуда давления с датчика силы
- (3) — Ширина давления с датчика силы. Это расстояние между началом и концом акта движения. Такие отрезки складываются и получается ширина.
- (4) — Площадь под кривой силы датчика
- (5) — Пиковая амплитуда крутящего момента двигателя
- (6) — Пиковый крутящий момент двигателя
- (7) — Среднее давление на сенсорах
- (8) — Средняя амплитуда крутящего момента
- (9) — Средний крутящий момент двигателя
- (10) — Ширина крутящего момента двигателя
- (11) — Площадь под кривой крутящего момента двигателя
- (12-16) — Индивидуальная пиковая амплитуда силы датчика силы

В качестве причин выбора таких входных данных можно отметить следующие. Видно различное поведение сенсоров в зависимости от типа поверхности (рис. 21а). Зависимость средней линейной скорости движения ноги на разных поверхностях при различных угловых скоростях (рис. 21б).



а) Запись активных датчиков силы на разных поверхностях



б) Средняя линейная скорость робота

Рис. 21 — Причины использования конкретных входных данных

В процессе обучения собранные данные были разделены на обучающее (80% данных) и тестовое множества (20%). Модель была обучена с использованием ядра на основе функции Пирсона VII (PUK).

Для оценки эффективности модели использовался тестовый набор. Производительность измерялась с точки зрения точности классификации и F1-score.

Функция принятия решения для SVM-модели (20):

$$f(x) = w^T x + b \quad (20)$$

где  $x$  — входной вектор,  $w$  является весовым вектором, и  $b$  — смещение.

Универсальное ядро на основе функции Пирсона VII (21):

$$K(x, y) = (1 + ((|x - y|^2)/\sigma^2)^\omega)^{(-1/\omega)} \quad (21)$$

Где  $x, y$  — векторы во входном пространстве,  $\|x - y\|$  обозначает евклидово расстояние между  $x$  и  $y$ ,  $\sigma$  — масштабный параметр, определяющий «разброс» ядра,  $\omega$  — это параметр формы, который влияет на форму границы принятия решения.

Данные собирались с установки, которая разрабатывалась так, чтобы было возможно быстро сменить тип поверхности, нога робота бесконечно могла совершать движения и узел с ногой был таким же как на реальном роботе (рис. 22).



Рис. 22 — 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 так же 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 работы, 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 (количества 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 эксперименталь-

ных 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 (ROBIO). — Macau, 2017. — Dec. — P. 290—295.
5. *Sokolov M., Bulichev O., Afanasyev I.* Analysis of ROS-based Visual and Lidar 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.