

**Буличев Олег Викторович**

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

Специальность 2.5.4 —  
«Разработка метода тактильного очуствления для мобильного  
шагающего робота»

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Работа выполнена в **университете Иннополис**.

Научный руководитель: **Доктор наук, профессор  
Малолетов Александр Васильевич**

Официальные оппоненты: **Фамилия Имя Отчество,  
доктор физико-математических наук, профессор,  
Не очень длинное название для места работы,  
старший научный сотрудник**

**Фамилия Имя Отчество,  
кандидат физико-математических наук,  
Основное место работы с длинным длинным длин-  
ным длинным названием,  
старший научный сотрудник**

Ведущая организация: **Федеральное государственное бюджетное образо-  
вательное учреждение высшего профессиональ-  
ного образования с длинным длинным длинным  
длинным названием**

Защита состоится **DD mmmmmmmm YYYY г. в XX часов** на заседании диссер-  
тационного совета **Д 123.456.78** при **Название учреждения** по адресу: **Адрес**.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке **Название библиотеки**.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения,  
просьба направлять по адресу: **Адрес**, ученому секретарю диссертационного со-  
вета **Д 123.456.78**.

Автореферат разослан **DD mmmmmmmm2023 года.**  
Телефон для справок: **+7 (0000) 00-00-00.**

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
**Д 123.456.78,**  
**д-р физ.-мат. наук**

**Фамилия Имя Отчество**

## 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).

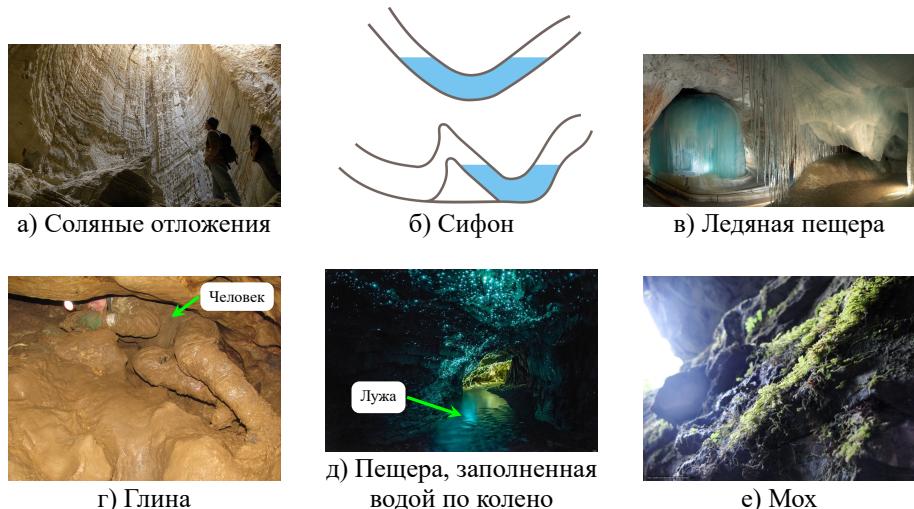


Рис. 1 — Препятствия, встречающиеся в пещерах

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. Та-

кие 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).

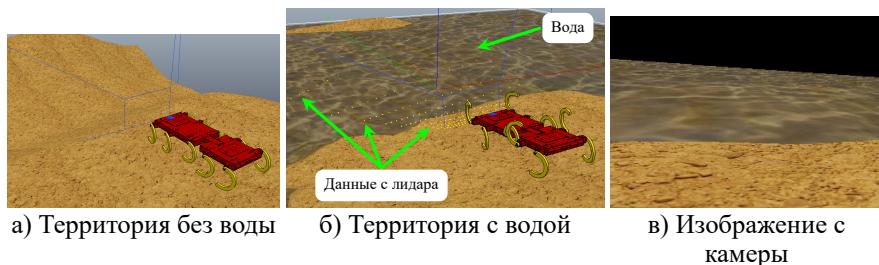


Рис. 2 — Примеры ситуаций, где навигация, основанная на камере или лидаре построит неправильную карту

**Целью диссертационной работы** является разработка и исследование методов робототехнической системы построения карты местности и определения геометрических и физических свойств опорной поверхности в робототехнической системе, созданной на базе многоугольного шагающего аппарата с тактильным ощущением без использования оптических сенсоров.

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. Разработка метода построения карты местности и определения геометрических свойств поверхности с помощью тактильного чувствования.
2. Реализация алгоритма, позволяющего определять физические свойства опорной поверхности.
3. Создание методики исследования датчика силы, когда площадь контакта нажатия на сенсор меньше чувствительной области самого сенсора.
4. Разработка метода оптимизации конструкции многоногих шагающих роботов с цикловыми движителями с одной степенью свободы критериям проходимости, покрытия опорной поверхности и её детализации, длины пройденного пути.

**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 — Прототип, на котором было сделано большинство экспериментов

Экспериментальные исследования были проведены с использованием прототипа (рис. 3), корпус которого состоит из двух сегментов с одной активной степенью свободы в сочленении между ними. Робот обладает 12 независимыми педипальпаторами, 6 ног в первом сегменте и 6 во втором.

Особенность конструкции робота в том, что возможно изменять угол между ногой и корпусом робота. Данное конструктивное изменение позволило сде-

лать перемещение робота всенаправленным, то есть робот может двигаться во все стороны без смены ориентации корпуса робота.

**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 и стендовое моделирования.

**Достоверность и обоснованность результатов.** Правдивость 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. разработанный метод построения карты местности и определения геометрической формы поверхности с помощью тактильного чувствования позволяет решать задачу построения карты местности в условиях отсутствия видимости и при движении по поверхности, покрытой рыхлыми материалами или жидкостями;

2. реализованный алгоритм определения физические свойства опорной поверхности, позволяет различать материалы с упругими, жёсткими, пластичными свойствами.

3. Предложенный метод оптимизации конструкции многоногих шагающих роботов с цикловыми движителями с одной степенью свободы позволяет решать задачу структурного синтеза для роботов с указанным типом движителей;

4. разработанная методика исследования датчика силы, дает возможность исследовать свойства сенсора при контакте с объектами меньше чувствительной области самого сенсора;

**Доказана** возможность построения карты местности и определения типа поверхности с помощью тактильного чувствования как в робототехническом симуляторе, так с помощью натурного эксперимента.

**Показано**, что оптимальное количество ног для циклового движителя с одной степенью свободы в ноге находится в диапазоне от 8 до 14 ног.

**Предложено** использовать преобразователь силы на основе полимерного материала Velostat. **Установлено**, что данный преобразователь можно использовать для определения типа поверхности и построения карты местности при площади контакта с поверхностью большей, чем 25% площади сенсора.

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

#### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. метод построения карты местности и определения геометрических свойств поверхности с помощью тактильного чувствования.

2. алгоритм, позволяющий определять физические свойства опорной поверхности.

3. методика исследования датчика силы, когда площадь контакта нажатия на сенсор меньше чувствительной области самого сенсора.

4. метод оптимизации конструкции многоногих шагающих роботов с цикловыми движителями с одной степенью свободы критериям проходимости, покрытия опорной поверхности и её детализации, длины пройденного пути.

**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 робота с помошь 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 10 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 «Технологий Компонентов Робототехники и Мехатроники» на базе Университета Иннополис по теме «Разработка роботизи-

рованных 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».

## Содержание работы

**Во первой главе** показан обзор существующих решений. Рассмотрены 3 глобальные темы: типы препятствий, которые могут встретиться; роботы, которые используются в исследованиях пещер; а так же методы построения карты местности.

Была проведена классификация машин, использующих ноги в качестве движителя. Подводя итог, можно сказать, что классификация следующая. Важно отметить, что в одном экземпляре может сочетаться несколько типов движителей.

1. Псевдошагающие машины
2. Шагающие машины с дополнительными опорными механизмами
3. Шагающие машины с движителями циклического действия
4. Ходьба с импровизированным следом
  - a) Ходьба - колесная
  - b) Прыжки и бег
  - c) Ползание
  - d) Лазание

В диссертации рассматривались роботы которые создавались специально для исследований пещер, в том числе и на Марсе. А так же те, которые потенциально могут быть использованы в условиях, определенных выше.

Как итог, их можно классифицировать следующим образом. Наземные роботы это шагающие, колесные, трековые и необычные. К необычным включены змеевидные, шарообразные и другие. К летающим были отнесены защищенные дроны и дирижабли.

Полноценной робототехнической системой является система, включающая в себя несколько роботов одного типа или комбинацию наземного и летающего роботов.

Для решения поставленной цели необходимо понимать в каких условиях будет использоваться робот. Основные структуры поверхностей следующие (рис. 1):

- твердые породы, прочные – мрамор, кварц, базальт (магма);
- твердые породы, мягкие – мел, гипс, соль, известняк;
- сыпучие грунты – песок, глина, снег;
- водные преграды – как и лужи (малый слой воды), так и целы залы, погруженные под воду. Часто встречаются сифоны;
- скользкие поверхности – отложения мха и плесени, лед ;

- разрушаемые поверхности – каменная грязь, паутина.

Так же были рассмотрены размеры пещер, чтобы понимать необходимый запас хода, размеры робототехнического комплекса.

Были рассмотрены классические SLAM алгоритмы, основанные на использовании камеры, стереопары, с использованием лидара, GPS, IMU а так же их различные комбинации.

Проведен обзор триангуляций, так как данный метод лежит в основе определения геометрических свойств объекта.

Были найдены способы получения облака точек объекта с помощью касания манипулятором данного объекта. Примерное местоположение объекта определялось камерой.

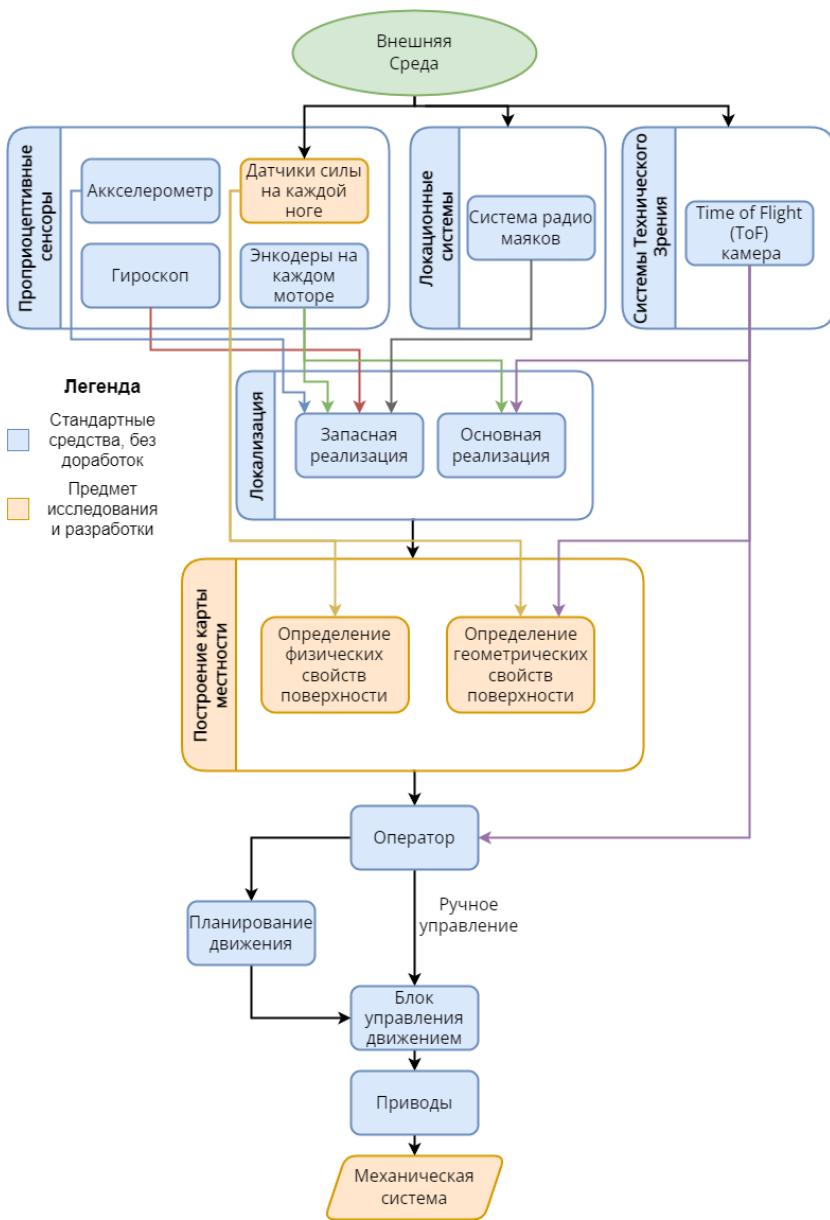
Определить тип поверхности можно так же с помощью различных сенсоров: визуально, IMU, с помощью снятия тока с моторов, момента с вала мотора, с помощью датчиков силы, установленных на конечность робота.

Были найдены следующие предложенные решения:

- робототехнические системы для исследования свободных пещер;
- Построение карты с помощью лидаров и камер;
- Получение конечно элементной сетки с помощью тактильного чувствования манипулятором.

Поставленная задача является новой и не встречается в научных публикациях российских и зарубежных авторов.

Итогом первой главы является создание обзора разработанной системы (рис. 4).



Оранжевым цветом выделены те компоненты системы, которые представляют собой предмет исследования в рамках диссертационной работы. Их разра-

ботка и научная новизна описаны в последующих главах диссертации. Голубым цветом выделены блоки, соответствующие которым элементы в разработанную систему были интегрированы как стандартные средства, без каких-либо существенных доработок.

Верхний блок — внешняя среда, то есть вся информация о внешнем мире, с которой работает робот.

Следующая группа блоков связана с сенсорами. Здесь представлены «Проприоцептивные сенсоры», то есть внутренние датчики, такие как гироскоп, акселерометр, энкодеры и датчики силы. Также есть группа блоков, посвященная техническому зрению. Последней группой элементов является «Локационные системы», представленные системой радио маяков.

Ниже находится следующая группа блоков «Локализация». Она основана на данных, полученных с сенсоров. В данной группе расположены два блока «Основная реализация» и «Запасная реализация». Первая является более точной. Она может быть реализована на основе системы радио маяков или с помощью системы технического зрения. Но самый точный результат может быть получен при объединении двух систем. Запасная реализация является резервной, когда отказала основная реализация, или когда та выдает некорректные результаты. Она основана на Инерциальном измерительном устройстве (IMU), датчиках силы и системе маяков.

В рамках диссертационного исследования были разработаны следующая группа блоков «Построение модели местности» был реализован и разработан автором диссертации. Она состоит из трех блоков: «Определение физических свойств поверхности», «Построение карты местности», «Определение геометрических свойств поверхности». Первый блок позволяет параллельно с исследованием геометрических свойств поверхности, посредством ее пальпирования, определять материал по которому ходит робот. Построение карты местности объединяет данные с других двух блоков и выводит результат в машино и человеко читабельные виды. Более подробно данная группа описана в главе ??.

Полученные данные попадают оператору, и оператор может управлять роботом, как в ручном режиме, так и просто задав область, куда роботу нужно прийти. Эта высокоуровневая команда передается в блок управления движением, которая в последствии преобразуется в низкоуровневые команды для приводов робота. С помощью данных команд, механическая система, представленная разработанным роботом приводится в движение и выполняется поставленная оператором задача.

В работе научная новизна представлена в элементах схемы, связанных с очувствлением: датчики силы, построение карты местности, определение физических свойств объекта.

**Вторая глава** покрывает разработку объекта исследования, а именно решение задачи структурного синтеза и инженерную разработку прототипа.

Зная область применения робототехнической системы возможно оптимизировать ее механическую часть. Были выставлены следующие требования.

1. иметь малые габариты, чтобы иметь возможность пролезать через щели в скальной породе и не застревать среди камней;
2. обладать достаточной проходимостью по сыпучим грунтам;
3. иметь возможность преодолевать малые водные преграды;
4. мог взбираться на большие каменные уступы.

Изучая данные требования возможно заметить, что часть из них коррелируют друг с другом, а часть - антагонируют. Чем больше количество полученных точек на пройденной поверхности, тем выше будет детализация карты. Одним из способов увеличения детализации это увеличение количества ног у робота. С другой стороны, это увеличивает длину робота, а следовательно робот хуже сможет проходить узкие участки с обилием поворотов. Чем большее расстояние робот сможет пройти за одно и то же время, тем быстрее будет построена карта и робот меньше влияет на окружающую среду при прочих равных условиях.

Как итог возникает задача, которая не имеет одного лучшего решения. Следовательно, это мультикритериальная задача оптимизации.

Было решено, что цикловый движитель с одной степенью свободы в ноге лучше всего подходит для решения подобных задач.

Для цикловых движителей с одной степенью свободы в ноге вопрос о количестве ног не имеет однозначного решения. Поэтому необходимо провести структурный синтез, чтобы определить их количество. Данная задача решалась с помощью генетического алгоритма.

Генетический алгоритм это эвристический алгоритм поиска, используемый для решения задач оптимизации и моделирования путём случайного подбора, комбинирования и вариации искомых параметров с использованием механизмов, аналогичных естественному отбору в природе. Для решения задачи использовалась библиотека Deap.

Математическая модель робота представлена следующим образом. Исследуется механическая система, состоящая из твёрдых тел (1), движение которых описывается дифференциальными уравнениями вида:

$$M\dot{\vec{u}} = \vec{g} \quad (1)$$

$$M = \begin{bmatrix} M_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & M_n \end{bmatrix}, M_i = \begin{bmatrix} m_i E_{3 \times 3} & 0 \\ 0 & I_i \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\vec{u}_i^T = [\vec{v}_i^T \quad \vec{\omega}_i^T] \quad (3)$$

$$\vec{g}^T = [\dots \vec{F}_i^T, \quad (\vec{\tau}_i - \vec{\omega}_i \times I_i \vec{\omega}_i)^T \dots] \quad (4)$$

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:

$$\phi(q_{j_1}, u_{j_1}, \dots, q_{j_k}, u_{j_k}, t) \geq 0 \quad (5)$$

$$\vec{q}_i^T = [\vec{x}_i^T \quad \vec{Q}_i^T] \quad (6)$$

$$\dot{\vec{q}}_i = \begin{bmatrix} E_{3 \times 3} & 0 \\ 0 & G(\vec{q}_i) \end{bmatrix} \vec{u}_i \quad (7)$$

$$\vec{g}_i = \tau_i^T \vec{z}_{i-1} - k \vec{v}_i \dot{\vec{q}}_i \quad (8)$$

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. 5) описывается на базе модели сухого трения и выражается следующими уравнениями:

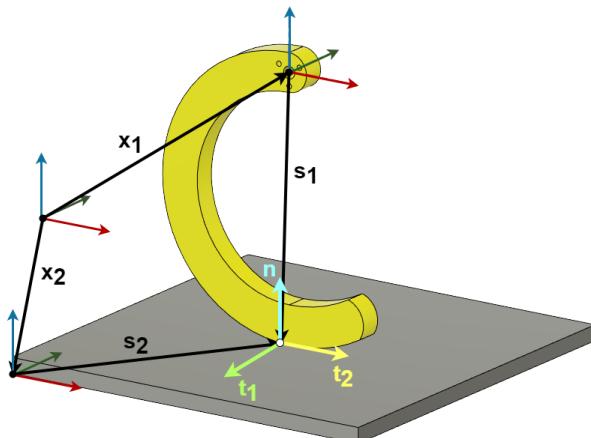


Рис. 5 — Описание переменных для модели взаимодействия опорной поверхности и ноги робота

$$\phi_u(\vec{q}) = g(\vec{q}) \geqslant 0 \quad (9)$$

$$g(\vec{q}) = (\vec{x}_1 + \vec{s}_1 - \vec{x}_2 - \vec{s}_2) \cdot \vec{n} \quad (10)$$

$$\frac{d}{dt} \phi_u(\vec{q}) \approx [\vec{n}^T \quad (\vec{s}_1 \times \vec{n})^T \quad -\vec{n}^T \quad (-\vec{s}_2 \times \vec{n})^T] \begin{bmatrix} \vec{v}_1 \\ \vec{\omega}_1 \\ \vec{v}_2 \\ \vec{\omega}_2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\begin{cases} \mu f_n \geqslant \sqrt{f_1^2 + f_2^2} \\ \|\vec{v}_t\| (\mu f_n - \sqrt{f_1^2 + f_2^2}) = 0 \\ \frac{\vec{f}_t}{\|\vec{f}_t\|} = -\frac{\vec{v}_t}{\|\vec{v}_t\|} \end{cases} \quad (12)$$

где,  $\phi_u(\vec{q})$  — функция связи;  $\mu$  — коэффициент трения между ногой и опорной поверхностью; радиус-векторы  $\vec{x}_{1,2}$ ,  $\vec{s}_{1,2}$  и орты координатных осей  $\vec{t}_{1,2}$ ,  $\vec{n}$  показаны на рисунке (рис. 5);  $f_{1,2}$  — значения сил трения вдоль осей  $t_{1,2}$  соответственно.

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. 6).

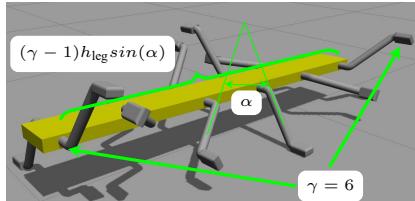


Рис. 6 — Схема модели робота для генетического алгоритма

Эту задачу можно сформулировать как мультикритериальную задачу оптимизации, где необходимо максимизировать дистанцию, пройденную за фиксированное время, и минимизировать длину робота (13). Параметрами индивида являлись  $\gamma$  и  $\alpha$ .

$$F \rightarrow \max = \beta \left( \omega_1 \cdot \overbrace{\delta}^{\text{Distance}} + \omega_2 \cdot \overbrace{\frac{1}{(\gamma - 1)h_{leg} \sin(\alpha)}}^{\text{Simplified body length}} \right) + (1 - \beta) \delta^{\omega_1} \left( \frac{1}{(\gamma - 1)h_{leg} \sin(\alpha)} \right)^{\omega_2} \quad (13)$$

где  $\delta$  дистанция,  $\beta$  аддитивный параметр,  $\omega_{1,2} \in [0..1]$  весовые коэффициенты.

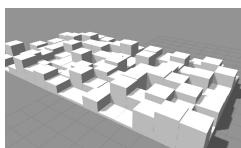
Весовые коэффициенты настраивались в зависимости от выбора приоритета. Невзирая на выбранные коэффициенты, оптимальным набор ног начинался с 8 и заканчивался 14. Это объясняется критерием статического равновесия, который, как оказалось, увеличивает проходимость механизма. В данном случае 4 ноги всегда будут касаться пола.

Было проведено два испытания. На первом испытании мы стремились найти только одного лучшего робота, только для местности T1 (рис. 7а). На втором этапе мы хотели видеть зависимость от разных типов ландшафтов при меньшем количестве индивидуальностей.

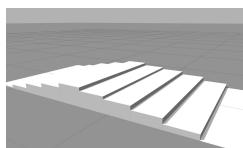
Первый этап: каждый робот проходил 10 разных ландшафтов по 9 секунд каждую. Вторая фаза: она имеет те же параметры, что и первая фаза, но с измененным размером популяции.

В соответствии с таблицей 1 (весовые коэффициенты равны 0.6 и 0.4 соответственно) видно, что мы имеем сходимость в параметрах. Видео прохождения

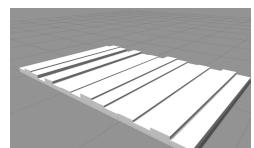
препятствия лучшим индивидом



а) T1: 3D-боксы с равномерным распределением высоты



б) T2: 2D-полосы с гауссовой функциональной высотой



в) T3: 2D-полосы с распределением высоты по гауссовой функции

Рис. 7 — Примеры сгенерированных территорий

Таблица 1 — Зависимость между статистикой значения пригодности и типами ландшафта

Территория, популяция	Параметры	Среднее значение	Std целевая функция
T1 (рис. 7а), 110	(6, 72)	2.38	0.34
T2 (рис. 7б), 55	(5, 68)	1.95	0.35
T3 (рис. 7в), 55	(6, 77)	2.08	0.33

В первом пункте требований к движителю (начало главы) стоит требование, чтобы робот не застревал при поворотах. Проблема застревания решается с помощью изменения угла между ногой и корпусом робота.

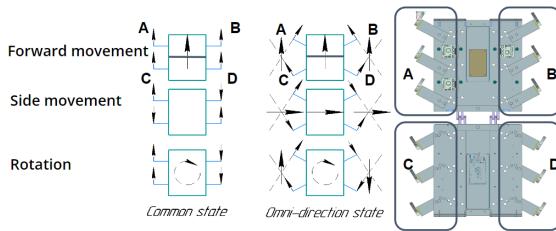


Рис. 8 — Векторное представление сил в классическом и всенаправленном состоянии

На рисунке 8 представлена иллюстрация данной концепции: для того, чтобы робот двигался во всех направлениях, необходимо разбить ноги на группы, чтобы получилось 4 группы А-Д.

Если сравнивать с классической компоновкой роботов (угол между корпусом робота и осью вала привода ноги равен 90 градусов), то вектор внешних сил будет таким, как на левой части рис. 8. Стрелка в центре робота — суперпозиция всех сил. Если изменить угол оси привода ноги в соответствии с предлагаемой концепцией, то возможно получить значения суперпозиции сил, представленные на рис. 8 в центре. То есть, чтобы переместить корпус робота направо, группы А и Д должны вращать ноги в одну сторону, а группы С и В — в противоположную. Правая часть рисунка иллюстрирует расположение групп ног на исследуемом роботе.

В рамках исследования было разработано четыре концепции робота Стри-Рус. В таблице 2 в строке недостатки объясняются основные причины перехода из одной итерации к другой. Концептуально было замечено, что высота ноги и

наличие сегмента разительно влияет на проходимость конструкции.



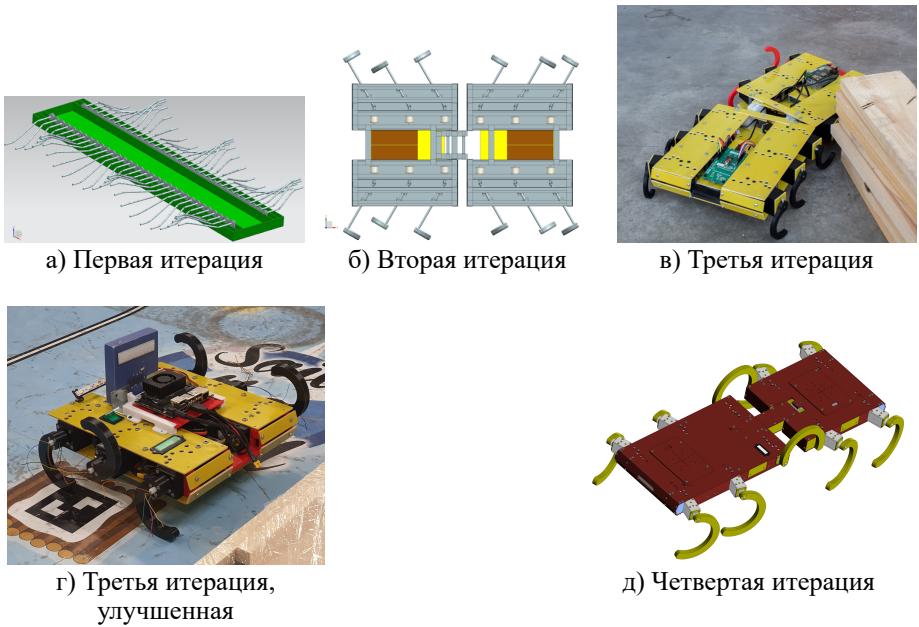


Рис. 9 — Итерации робота СтриРуса

Таблица 2 — Сравнение итераций робота

Итерация	1 (рис. 9а)	2 (рис. 9б)	3 (рис. 9в)	3+ (рис. 9г)	4 (рис. 9д)
Кол-во ног	54	12	12	6	10
Кол-во сегментов	1	2	2	1	2
Тип соединения	—	Тангаж	Тангаж, рыскание	—	Тангаж
Отн. угол телом – нога, градусы	0	0–45	0, 15, 30, 45	0	0, 15
Высота ноги, мм	54	60	60	90	170
Особенности	Волноход	Механизм, который позволяет непрерывно изменять отн. угол	Двухстепен-ной узел, соединяющий сегменты	Большие ноги	Гигантские ноги
Недостатки	Невозможно установить сенсоры на ноги. Много подвижных частей	Слишком сложный механизм, изменяю-щий отн. угол	Мал. ноги. Избыточная вторая степень свободы в соединительном узле	1 сегмент. Маленькие ноги	—

Как итог, был разработан 10 ногий двух сегментный робот СтриРус. 10 ног было выбрано на основе результатов, полученных во время решения мультикритериальной задачи оптимизации с помощью генетического алгоритма.

Конструкция робота соответствует всем требованиям, поставленным вначале. А именно, возможность проходить сквозь узкие пространства, иметь возможность преодолевать большие каменные гряды и возможность эффективно перемещаться по сыпучим грунтам.

**Третья глава** посвящена разработке и исследованию самодельного преобразователя силы на основе Velostat

Существует несколько типов датчиков, которые могут измерять контактные силы и распределение давления. Это могут быть оптические, пьезорезистивные, пьезоэлектрические, магнитные, емкостные, на основе оптических волокон. Промышленные датчики силы и момента (F/T) широко распространены на гуманоидах (Atlas, Fedor) или четвероногих (Spot, AnyMal). Однако они слишком велики для небольших роботов, таких как RHEX, WHEGS или StriRus.

Оптические и магнитные датчики обладают теми же недостатками. Емкостные датчики требуют высокой точности изготовления. Кроме того, датчики перечисленных типов довольно дороги, что делает их использование нецелесообразным в исследовательских роботах, которые работают в опасных условиях и могут быть потеряны в процессе исследования пещеры. Недорогой альтернативой являются тензометрические датчики.

Самый популярный тип тензометрического датчика – тензорезистивный датчик. Другой тип – пьезорезистивные датчики на основе проводящих волокон или полимеров. Они недорогие, очень гибкие и компактные. Одним из основных недостатков является значительный гистерезис.

В представленной работе используется материал Velostat (Linqstat) (рис. 10а) в качестве промежуточного слоя для датчика (рис. 10б).



а) Материал Velostat



б) Простейший преобразователь силы на основе Velostat

Рис. 10 — Примеры использования Velostat

При исследовании преобразователя силы на основе Velostat, было замечено, что площадь нажатия влияет на показания преобразователя. Поэтому было решено характеризовать материал для случаев, когда нагрузка меньше, чем размер сенсора.

Созданный преобразователь состоит из двух медных оболочек, разделенных слоем Velostat. Давление на датчик приводит к изменению его сопротивления: чем выше давление, тем ниже сопротивление. На (рис. 11) показана рабочая область сенсора, основанная на весе, который может быть приложен на одну ногу робота.

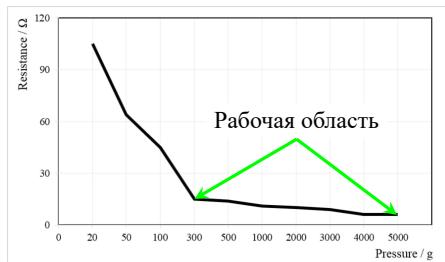


Рис. 11 — График зависимости прикладываемого веса от сопротивления

Исследования преобразователя Velostat, для случаев которых площадь нагрузки меньше, чем размер преобразователя, были проведены с помощью разработанного для этой цели исследовательского стенда. Среди требований к стенду можно отметить: необходимость контролировать силу нажатия и повторяемость эксперимента как по величине, так и по расположению площадки контакта инструмента и исследуемого преобразователя силы. Указанным требованиям возможно удовлетворить, используя коллаборативный робот-манипулятор, который будет управляться с помощью импедансного управления.

Использование коллаборативного робота позволяет также удовлетворить требованиям безопасности и допустить работу робота в непосредственно близости от экспериментатора. Разработанный стенд, представлен на рисунке 12а.



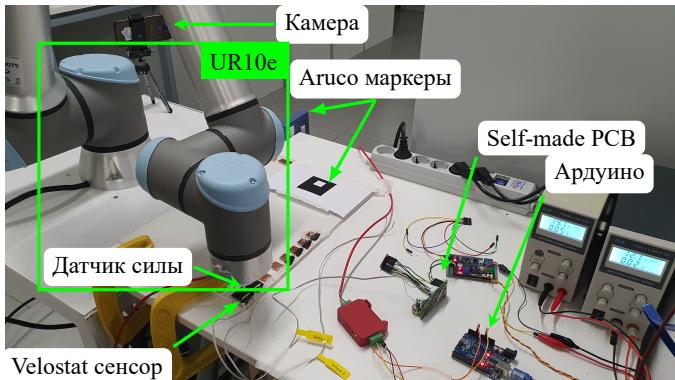
Видео работы стенда

Для касания только части объекта исследования были разработаны различные концевые инструменты. Такие размеры были выбраны из-за размеров преобразователя. Минимальный размер препятствия, которое может коснуться было взято за 2 мм. А длина ребра датчика — 15 мм. Поэтому 15 мм концевой инструмент является максимальным (рис. 13а).

На рисунке ниже (рис. 14) представлен результат работы импедансного управления на частоте 450 Hz. Необходимая сила нажатия — 17 N.

В исследовании были проведены:

1. **статический эксперимент.** Цель — определить коэффициенты для математической модели преобразователя. Для этого на сенсор кладется известная нагрузка на 60 секунд (за это время можно явно наблюдать гистерезис) и собираются данные с преобразователя;



а) Общий вид экспериментального стенда



б) Способ нивелировать ошибку по углу с помощью Агуко маркеров

Рис. 12 — Разработанный экспериментальный стенд

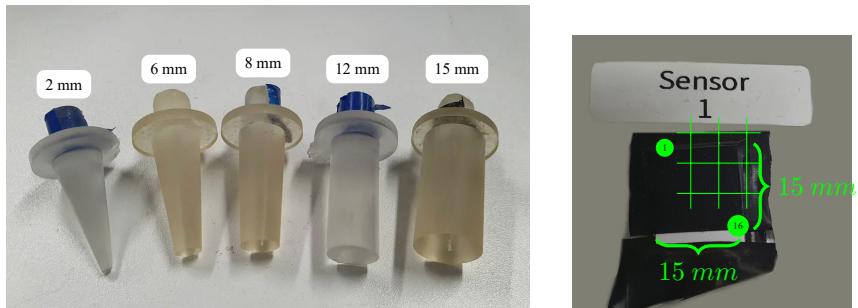
**2. динамический эксперимент.** Цель — определить влияние показаний сенсора в зависимости от положения площадки контакта. Для этого преобразователь представлен в виде матрицы  $4 \times 4$ . Размер преобразователя в эксперименте 15 на 15 мм. Манипулятор нажимает на преобразователь с одинаковым давлением на протяжении всех экспериментов в различные позиции на преобразователе, используя пять различных концевых эффекторов (диаметр окружности от 2 мм до 15 мм) (рис. 13б).

Статическим экспериментом проверялась формула (14). Из-за гистерезиса необходимо учитывать время нажатия на объект. При прикладывании на сенсор константной нагрузки показания сенсора будут меняться.

$$V_{out} = V_0 + p[k_p + k_e(1 - e^{-\frac{(t-t_0)}{\tau_{res}}})](1 - e^{-\frac{A}{p}}) \quad (14)$$

$$k_p = A_1 e^{-A_2 p}; \tau_{res} = B_0 + B_1 e^{-\frac{p}{B_2}} \quad (15)$$

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 ис-



а) Инструмент (концевой эффектор) для нажатия объект исследования с диаметром нажатия меньше, чем сам объект

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

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

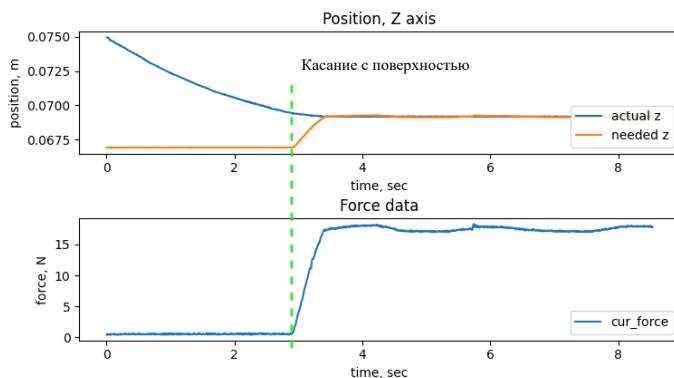


Рис. 14 — Графики зависимости силы и позиции по  $z$  от времени во время эксперимента по исследованию Velostat

пользовался робастный нелинейный алгоритм наименьших квадратов. Результат представлен ниже (рис. 15).

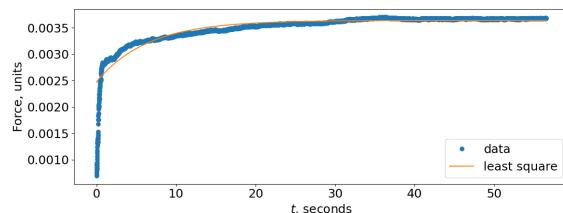


Рис. 15 — Результаты статического эксперимента

Ниже (рис. 16) представлены некоторые результаты распределения ошибок по площади сенсора при взаимодействии с концевыми эффекторами разных размеров. Ошибки определялись как разница между показаниями калиброванного сенсора силы Futek и исследуемого преобразователя на базе Velostat. На рисунке 16а показаны ошибки для концевого эффектора диаметром 2 мм, а на рисунке 16б — для концевого эффектора диаметром 8 мм.

Можно заметить, что в 16б максимальная разница между Futek и Velostat не более 0.2 единиц в одном месте. Остальные элементы сетки не превышают 10%. Такая же тенденция продолжается как и при увеличении размера концевого эффектора, так и на других сенсорах.

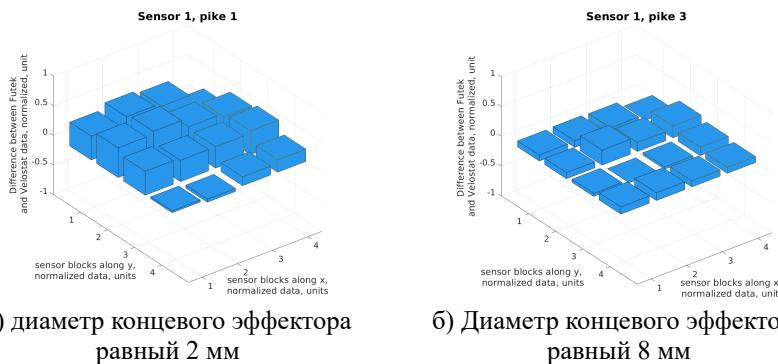


Рис. 16 — Динамический эксперимент

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 создания алгоритма построения карты с помощью тактильного чувствования, определения типа поверхности.

Традиционно, карта для навигации представляется в виде облака точек. Тогда, без предложенного алгоритма, будут получено очень разреженное облако точек, где точки будут являться точками касания лапок робота с поверхностью.

Сделав предположение, что расстояние между ногами робота мало относительно целой пещеры, мы можем предположить, что поверхность между ногами является плоскостью.

В рамках исследования предполагается, что робот движется по поверхности, у которой каждому набору координат  $x, y$  соответствует одно и только одно значение координаты  $z$ .

Был реализован следующий алгоритм. Вначале 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. 20)). На ее основе получается необходимое плотное облако точек (рис. 19в).

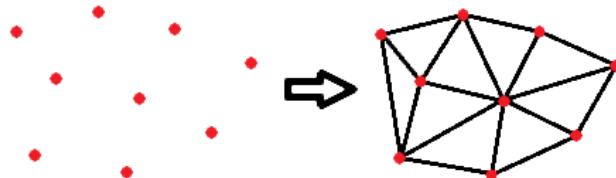
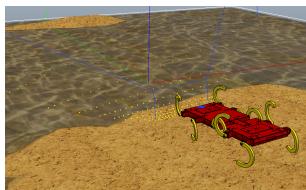


Рис. 17 – 2D Триангуляция Делоне (выпуклая оболочка)

Реализованный алгоритм проверялся, как в симуляции (Рис. 2, 18), так и на реальном роботе (рис. 22). Видео



а) Начало движения



б) Конец движения

Рис. 18 – Эксперимент в симуляторе

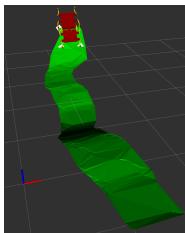
Ниже представлены полученные результаты (рис. 19). Для оценки точности полученных данных использовались метрики C2C (16) и C2M (рис. 21).

$$d_H(X, Y) = \sup_{m \in M} \{ |\text{dist}_X(m) - \text{dist}_Y(m)| \} \quad (16)$$

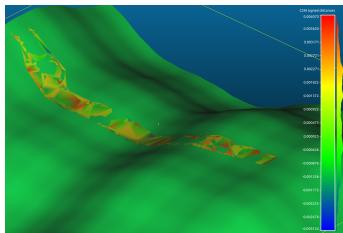
Где  $X, Y$  непустые подмножества метрического пространства  $M$ ;  $\text{dist}_X : M \rightarrow \mathbb{R}$   $\text{dist}_X : M \rightarrow \mathbb{R}$  обозначает функцию расстояния до множества  $X$ .

На рисунке 20 проиллюстрирована важность модификации триангуляции Делоне. Как можно заметить (рис. 20б) алгоритм построил карту местности там, где робот не ходил и стоит стена. При использовании вогнутой оболочки (рис. 20в) данная проблема не наблюдается.

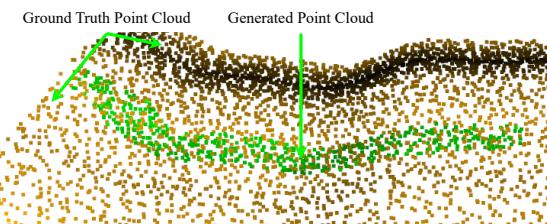
Как итог, среднеквадратичная ошибка для С2С метрики была в среднем равна 5 см. А для С2М 1 см. В натурном эксперименте среднеквадратичная ошибка по метрике С2С получился 8 см.



а) Полигональная сетка, созданная 2D Триангуляцией Делоне (вогнутая оболочка)

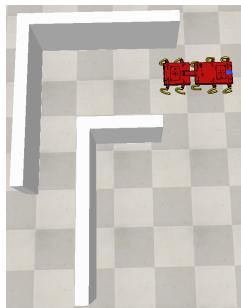


б) Наложенные полигональные сетки

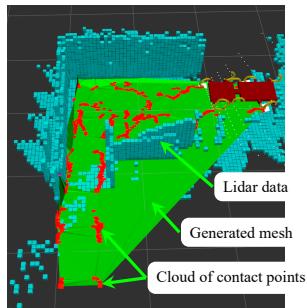


в) Наложенные облака точек

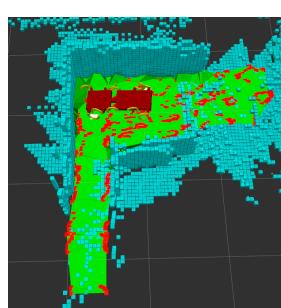
Рис. 19 — Результат эксперимента



а) Пример поля



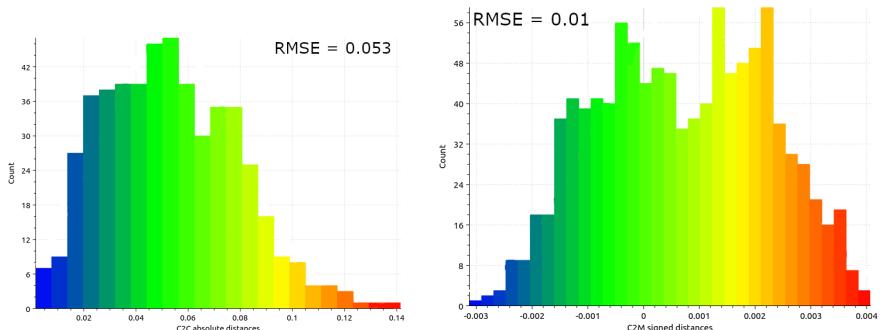
б) Выпуклая оболочка



в) Вогнутая оболочка

Рис. 20 — Объяснение необходимости модификации алгоритма Делоне

Задачу определения типа поверхности можно определить следующим образом. Робот идет по поверхности, и собирает данные с датчиков силы, с момента на моторе и IMU. На основе предварительного обучения, данные обрабатываются и кластеризуются, на основе предварительно определенной базе знаний территории.

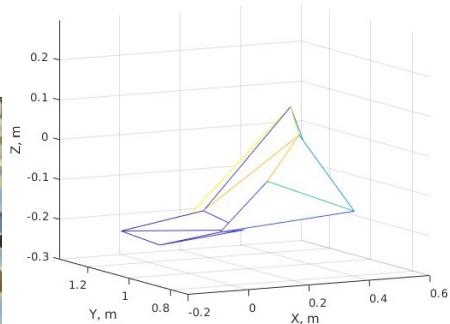


а) Метрика C2C: гистограмма ошибок (абсолютное расстояние от точки до ближайшей реферальной точки)      б) Метрика C2M: Гистограмма ошибок (относительное расстояние от точки до ближайшей реферальной точки)

Рис. 21 — Метрики оценки точности полученной карты



а) Робот проходит препятствие

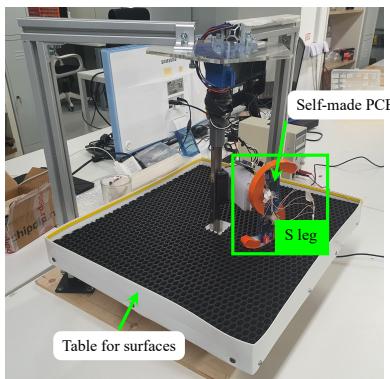


б) Полученная полигональная сетка

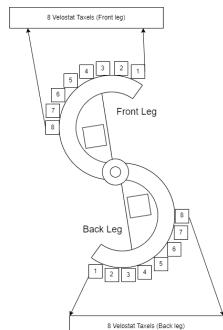
Рис. 22 — Пример натурного эксперимента

Задачу обучения удобнее всего проводить в лабораторных условиях. Экспериментальная установка соответствует следующим требованиям: возможность установить новые поверхность и сменять их быстро. Это нужно для легкого создания базы знаний поверхностей. Бесконечное движение, для скорости обучения. Узел с ногой должен быть взят с робота, чтобы не пришлось решать похожую задачу на роботе.

Все это было достигнуто благодаря разборному экспериментальному столу и 2ух степенному механизму, который ходит по окружности (рис. 23а). Для бесконечного движения пришлось соединить две ноги робота в одну. На рисунке ниже (рис. 23б) показаны как установлены сенсоры на получившейся ноге.



а) Общий вид экспериментальной установки



б) Пояснение по расположению сенсоров на ноге робота

в) Каменистая поверхность

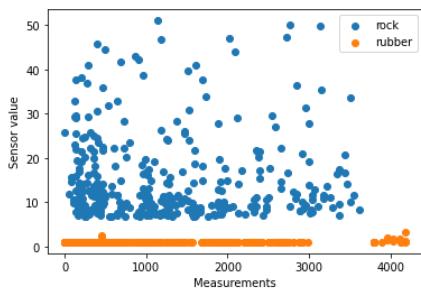
Рис. 23 — Экспериментальная установка для определения типа поверхности

Были взяты 2 сильно разных поверхности и изучены сырье данные. Резина

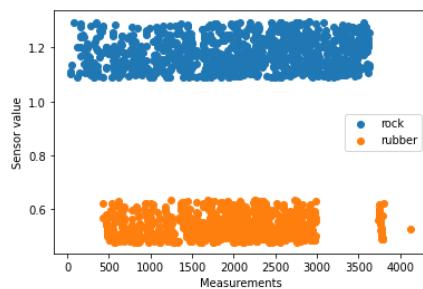
(рис. 23а) , камень (рис. 23в)



Ниже (рис. 24) представлены сырье данные с лапок робота. Сыре данные легко различить, но можно заметить, что абсолютные значения у разных сегментов различно. Поэтому при обучении необходимо их нормализовать.



а) Передняя часть ноги, 8ой сегмент



б) Передняя часть ноги, бой сегмент

Рис. 24 — Сравнение сырьих данных после эксперимента с разных сегментов ноги

Карта местности может быть построена с помощью 2D триангуляции Делоне (вогнутая оболочка). Входными данными для алгоритма является разреженное облако точек касаний робота поверхности. Они получены с помощью преобразователя силы на основе Velostat.

Точность, полученная в симуляторе равна примерно 5 см, а во время натурного эксперимента – 8 см, что является адекватным результатом для поставленной задачи.

С помощью разработанного преобразователя силы возможно различать 2 типа поверхности: резину и каменистую гряду.

## **Заключение**

Основной научный результат диссертации заключается в решении актуальной научной задачи, имеющей важное практическое значение: разработка и исследование робототехнической системы построения карты местности и определения геометрических и физических свойств опорной поверхности на базе многоугольного шагающего аппарата с тактильным обучением без использования оптических сенсоров.

Данное решение подходит для первичного исследования замкнутых труднодоступных пространств, где отсутствует освещение, 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.

Предложенное решение подходит для первичного изучения закрытых недоступных мест, где отсутствует освещение, много грязи, пыли, и водных преград. Данное решение позволяет получить примерные габариты и устройство закрытых мест. Методы и концепты навигации предоставленной системы имеют все шансы быть применены как запасная система навигации для иных робототехнических систем, когда больше точная — оптическая 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. Обобщая, была 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.

Более того, для понимания условий применений разрабатываемой робототехнической системы, было 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.

Выводом обзора является описание применимости разработанной 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 пришлось разработать 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. Это важный концепт, так как по обзору пещер стало ясно, что пещеры имеют очень большую девиацию в ширину.

3. Изучив существующие тактильные сенсоры было решено разработать и исследовать преобразователь силы на основе Velostat. Для этого пришлось физические создать преобразователь, адаптировать его под конкретное применение. В течение разработки сенсора были найдены особенности, 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, характеристики преобразователя удовлетворяют требованиям к системе тактильного восприятия шагающего робота, когда ожидаемый размер площади контакта превышает 25 процентов площади преобразователя.

4. Было разработан метод картографирования с помощью ощупывания поверхности. Для первичной проверки гипотез была разработана сцена в симуляторе CoppeliaSim. После череды экспериментов, было решено использовать и реализовать алгоритмы вогнутой Триангуляции Делоне с использованием альфа формы.

Так же результат интеллектуальной деятельности проверялся на в натурном эксперименте и была получена точность в 8 см, что является приемлемой для данной задачи.

5. Для получения максимально полной информации о проходимой поверхности, необходимо знать еще и тип поверхности, по которой проходит робот. Это было реализовано с помощью методов машинного обучения, а все данные были получены из натурных экспериментов. Как результат, точность определения примерно в 85 процентов (3 типа поверхности, земля, резина и камень), позволяет довольно эффективно использовать данные знания для реализации алгоритмов управления.

## **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 [Текст] // 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 [Текст] // 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 [Text] // 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 [Text] // 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 Li-dar Odometry for a Teleoperated Crawler-type Robot in Indoor Environment: [Text] // Proceedings of the 14th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics. — Madrid, Spain, 2017. — P. 316–321.

### **Зарегистрированные программы для ЭВМ**

6. Программа планирования траектории движения ног двенадцатиногого робота с использованием фреймворка ROS [Текст] : 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 [Текст] : 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 [Текст] : пат. / О. В. Буличев. — Заявл. 27.12.2021, 2021681297 (Российская Федерация). — Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2021681862.

9. Программа управления звенями шагающего двенадцатиногого робота с помощью геймпада в робототехническом симуляторе Ignition [Текст] : 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 очуствления [Текст] : 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 [Текст] : 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 [Текст] : 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 [Текст] : 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 [Текст] // Молодежный научно-технический вестник. — 2016. — № 10. — С. 7.
15. *Буличев О. В.* Обучение прямолинейному движению многоногого робота на основе эволюционного алгоритма [Текст] // 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 многоногого биомиметического шагающего робота с использованием фреймворка ROS [Текст] // Актуальные научные исследования в современном мире. — 2021. — № 11. — С. 374—377.

17. Буличев О. В., Ахметшин А. А. Прямолинейное движение всенаправленного многоногого шагающего робота Стрирус [Текст] // 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 [Текст] // 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.

*Буличев Олег Викторович*

Разработка метода тактильного ощущения для мобильного шагающего робота

Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. тех. наук

Подписано в печать \_\_\_\_\_.\_\_\_\_\_.\_\_\_\_\_. Заказ № \_\_\_\_\_

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Типография \_\_\_\_\_