

## **НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (ДИССЕРТАЦИЯ)**

### **THESIS**

**ПО НАПРАВЛЕНИЮ ПОДГОТОВКИ**  
**09.06.01 ИНФОРМАТИКА И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА**  
**GRADUATE THESIS FIELD OF STUDY**  
**09.06.01 COMPUTER SCIENCE**

**НАПРАВЛЕННОСТЬ (ПРОФИЛЬ)**  
**«Теоретические основы информатики»**  
**AREA OF SPECIALIZATION / ACADEMIC PROGRAM TITLE:**  
**«Theoretical Computer Science»**

**Тема**

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

**Topic**

**Tactile perception method development for a mobile walking  
robot**

Работу выполнил /  
Thesis is executed by

**Буличев Олег Викторович**

подпись / signature

Научный руководитель /  
Thesis supervisor

**Малолетов Александр  
Васильевич**

подпись / signature

**Оглавление**

	Стр.
<b>Введение . . . . .</b>	<b>4</b>
<b>Глава 1. Литературный обзор . . . . .</b>	<b>9</b>
1.1 Описание пещеры . . . . .	9
1.2 Роботы, которые могут использоваться для исследования пещер . .	13
1.2.1 Классификация шагающих машин . . . . .	15
1.2.2 Типы мобильных робототехнических комплексов . . . . .	16
1.3 Обзор существующих мобильных робототехнических комплексов .	16
1.3.1 Исследования с похожими роботами . . . . .	18
1.4 Классификация сенсорных устройств . . . . .	20
<b>Глава 2. Оптимизация конструкции робота . . . . .</b>	<b>23</b>
2.1 Решение задачи структурного синтеза . . . . .	23
2.1.1 Генерирование местности, над которой будет проходить робот . . . . .	26
2.2 Решение задачи на основе кинематики . . . . .	31
2.3 Разработка движителя . . . . .	34
<b>Глава 3. Разработка и исследование преобразователя силы на основе Velostat . . . . .</b>	<b>38</b>
3.1 Физическая реализация преобразователя силы на основе Velostat .	39
3.2 Разработка экспериментального стенда . . . . .	42
3.3 Экспериментальная часть . . . . .	44
<b>Глава 4. Разработка метода тактильного ощущения . . . . .</b>	<b>49</b>
4.1 Картографирование с помощью ощупывания поверхности . . . .	49
4.2 Определение типа поверхности . . . . .	50
<b>Заключение . . . . .</b>	<b>57</b>
<b>Список сокращений и условных обозначений . . . . .</b>	<b>58</b>
<b>Словарь терминов . . . . .</b>	<b>59</b>
<b>Список литературы . . . . .</b>	<b>60</b>

**Список рисунков . . . . .** 71

**Список таблиц . . . . .** 73

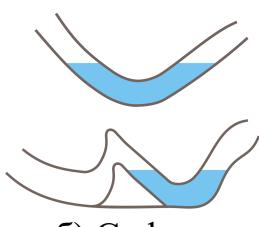
## Введение

Исследование пещер является опасной, но важной задачей. В них можно найти множество полезных ресурсов, такие как металлы, драгоценные камни, редкие разновидности мхов.

Движение по пещере часто происходит по опасными и труднопроходимыми участкам. К примеру таковыми являются сифоны (Рис. 1б), скользкие грунты (Рис. 1в и 1е). В пещерах недостаток света, часто влажно.



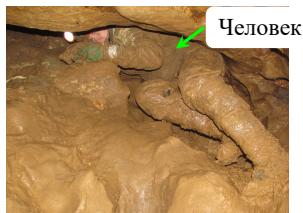
а) Соляные отложения



б) Сифон



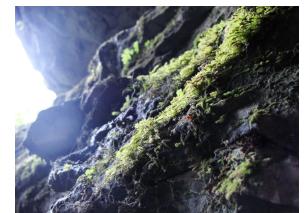
в) Ледяная пещера



г) Глина



д) Пещера, заполненная водой по колено



е) Мх

Рисунок 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 робота в пещере необходимы сенсоры. Классическими внешними сенсорами являются камера и лидар.

В характерных для пещеры условиях сенсоры могут выйти из строя. 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).

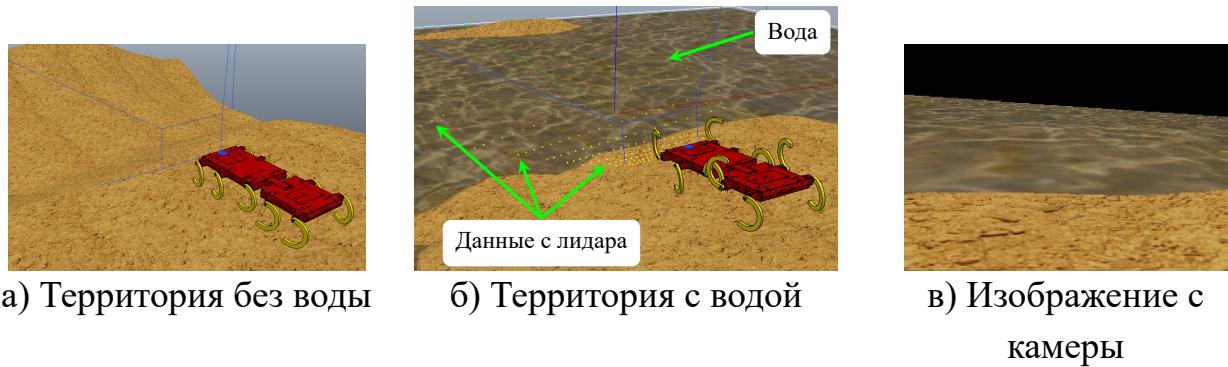


Рисунок 2 — Пример ситуации, где навигация, основанная на камере или лидаре построит неправильную карту

Эту проблему возможно частично решить с помощью другого набора сенсоров. С помощью внутренних сенсоров, на которые меньше влияют внешние факторы. Такими сенсорами являются Инерциальное Измерительное устройство (IMU), датчики силы.

Для того, чтобы решить проблему представленную в рисунке 2 необходимо разработать методику получения полезной информации об окружающей среде с помощью данного набора датчиков.

На решение схожих проблем были выделены средства DARPA Subterranean Challenge, а так же фондами НТИ и РФФИ.

**Целью диссертационной работы** данной работы является разработка метода тактильного ощущения мобильного шагающего робота в закрытых пространствах естественного или искусственного происхождения, в которых невозможно получение данных со спутниковой навигации, затруднено применение оптических сенсоров.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. спроектировать объект исследования — шагающего многоногого робота: подобрать количество ног, их форму. Обосновать конструкцию робота и количество степеней свободы;
2. подобрать сенсоры для решения задачи построения карты местности, без использования оптических сенсоров;
3. разработать методику построения карты местности и определения типа поверхности с помощью тактильного ощущения;
4. решить проблему локализации на основе тактильного ощущения.

**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.



Рисунок 3 — Прототип, на котором было сделано большинство экспериментов

Основная часть экспериментальных исследований проведена с прототипом (Рис. 3), корпус которого состоит из двух сегментов с одной активной степенью свободы. Робот обладает 12 независимыми лапками, 6 лап в первом сегменте и 6 во втором.

Особенность конструкции робота в том, что возможно изменять угол между лапкой и корпусом робота. Данное конструктивное изменение позволило сделать 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:** Сформулирована и решена задача построения карты местности с помощью тактильного ощущения шагающего робота с цикловыми движителями и датчиками силы, установленными на опорных поверхностях движителей. Разработан метод оптимизации конструкции многоногого шагающего

робота с цикловыми движителями. Разработана методика автоматизированного исследования датчика силы.

**Доказана** возможность построения карты местности и определения типа поверхности с помощью тактильного очуствления 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 рассматривать как единое тело, при площади нажатия больше 50% площади сенсора.

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

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

1. метод оптимизации конструкции многоногих шагающих роботов с цикловыми движителями с одной степенью свободы;
2. разработанная методика исследования датчика силы, когда площадь нажатия на сенсор меньше самого сенсора;
3. алгоритм, позволяющий определять тип поверхности;
4. методика построения карты местности с помощью датчиков силы, установленных на ногах робота.

**Значимость работы.** Реализация полученных результатов в виде продукта позволит получать информацию о типе пройденной поверхности, а так же строить карту поверхности под небольшим слоем воды (лужа), там где лидар и камера не смогут выдать адекватный результат.

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались на:

- ICINCO 2017 — 14th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (Madrid, Spain, 26-28 july 2017);
- IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, ROBIO 2017 (Macau, China, 5-8 december 2017);
- международной научно-практической конференции «Прогресс транспортных средств и систем» (г. Волгоград, 9-11 октября 2018 г.);
- 23rd IEEE FRUCT Conference (Bologna, Italy, 13-16 november 2018).
- XXXI международной конференции молодых ученых и студентов МИКМУС-2019 (г. Москва, 4-6 декабря 2019 г.);

- Международная конференция «Зимняя Школа Робототехники в Сириусе — 2022» (г. Адлер, Россия, 25 января - 6 февраля 2022)

**Личный вклад автора.** Все научные результаты диссертации, выдвигаемые для защиты, получены автором лично.

Диссертационная работа была выполнена при поддержке грантов:

- НТИ по поддержке Центра «Технологий Компонентов Робототехники и Мехатроники» на базе Университета Иннополис по теме «Разработка роботизированных платформ для автономной подземной и наземной инспекции местности в условиях трудной проходимости и плохой видимости».
- РФФИ № 20-38-90265 по теме «Разработка метода очувствления мобильного шагающего робота, перемещающегося в закрытом пространстве естественного происхождения».

**Структура работы.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и 4 приложений. Полный объём диссертации составляет 72 страницы, включая 43 рисунка и 4 таблицы. Список литературы содержит 96 наименований.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и 4 приложений. Полный объём диссертации составляет 73 страницы, включая 43 рисунка и 4 таблицы. Список литературы содержит 96 наименований.

## Глава 1. Литературный обзор

Разработка методов требует глубокого погружения в тематику работы, поэтому необходимо рассмотреть комплексно весь перечень проблем, встречающихся в пещерах.

### 1.1 Описание пещеры

Пещера – полость в верхней части земной коры, сообщающаяся с поверхностью одним или несколькими входными отверстиями. Пещеры естественного происхождения бывают следующими.

- Карстовые.
- Тектонические.
- Эрозионные.
- Ледниковые.
- Вулканические.

Начнем описание с структуры поверхностей:

- твердые породы, прочные – мрамор, кварц, базальт (магма) (Рис. 1.1);
- твердые породы, мягкие – мел, гипс, соль, известняк (Рис. 1.1);
- сыпучие грунты – песок, глина, снег (Рис. 1.2);
- водные преграды – как и лужи (малый слой воды), так и целы залы, погруженные под воду. Часто встречаются сифоны (Рис. 1.3);
- скользкие поверхности – отложения мха и плесени, лед (Рис. 1.4);
- разрушаемые поверхности – каменная грязь, паутина.



а) Кристаллы



б) Солевые отложения



в) Мagma



г) Известняк

Рисунок 1.1 — Твердые поверхности



а) Песок



б) Глина

Рисунок 1.2 — Сыпучие грунты

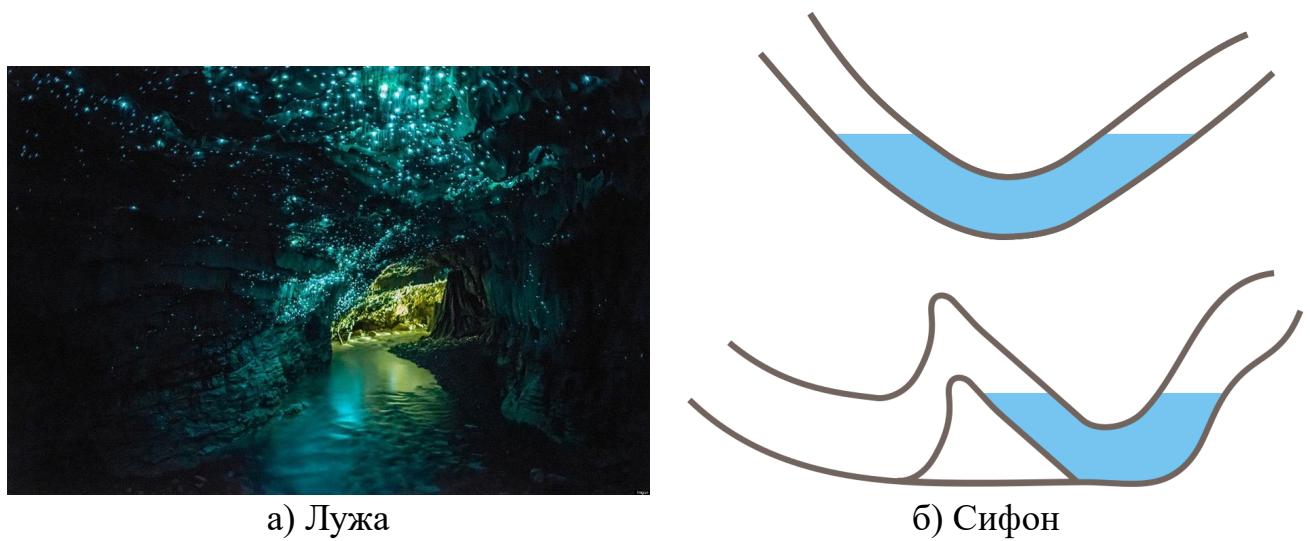


Рисунок 1.3 — Водяные препятствия



Рисунок 1.4 — Скользящие поверхности

Для поставленной задачи классификация необходима, чтобы понимать какие типы препятствия и породы будут окружать робота.

Так же необходимо рассмотреть размеры пещер, чтобы понимать необходимый запас хода, размеры робототехнического комплекса. Процентное соотношение суши/воды необходимо понимать, чтобы при разработке робота понимать какой основной функционал необходим.

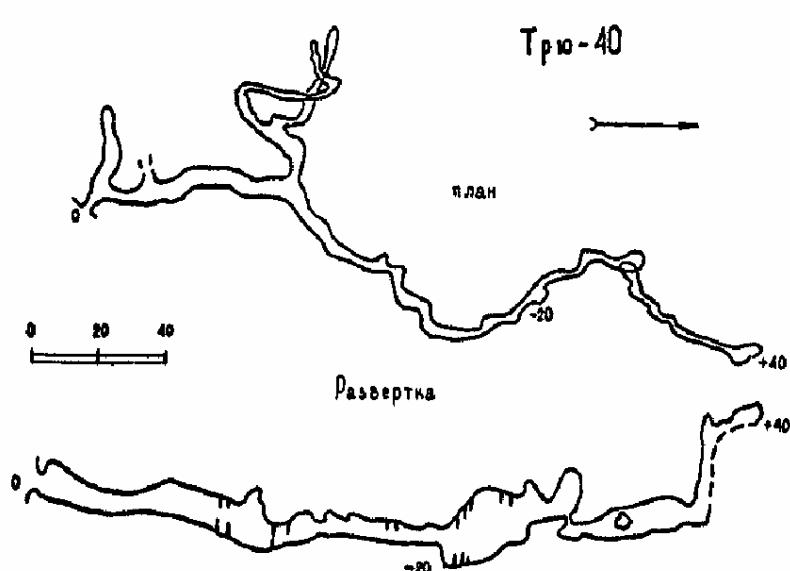
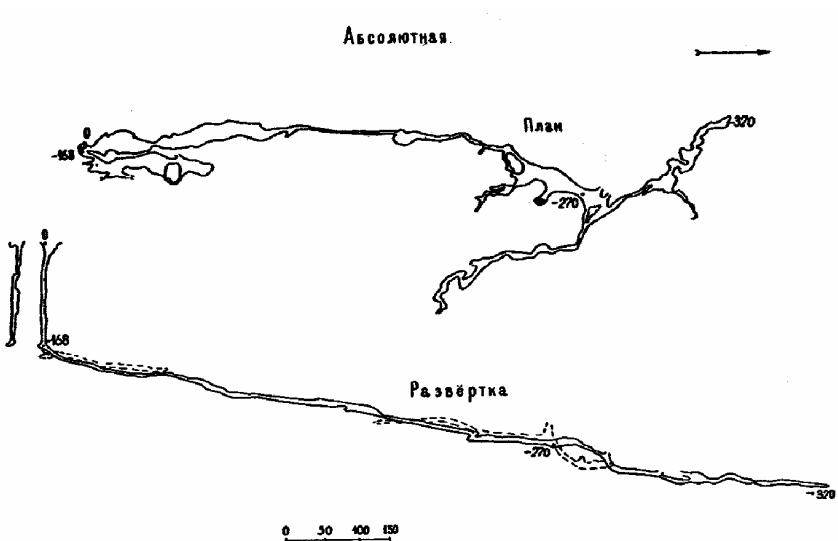
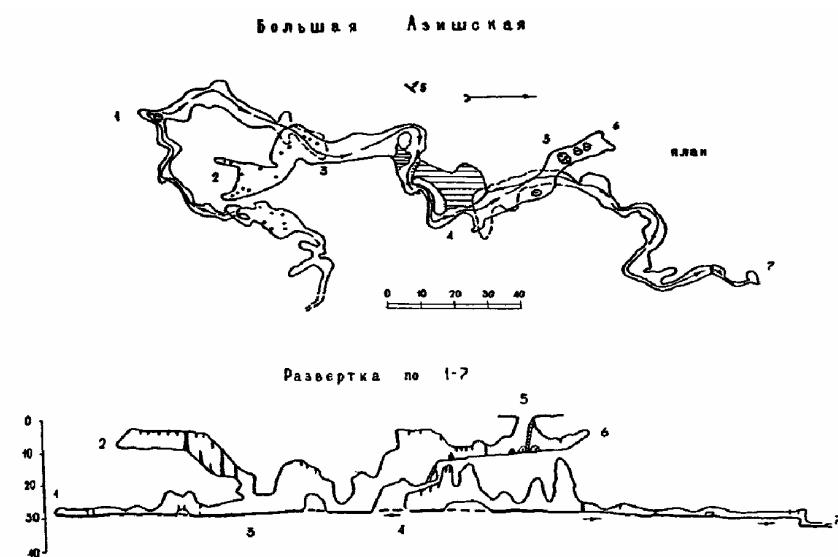


Рисунок 1.5 — Размеры пещер

Основная проблема, что существуют карты тех пещер, в которые человек может пройти. Но карты пещер, куда человек не может попасть из-за своих размеров – отсутствуют. Поэтому определение необходимых размеров остается важной задачей.

## 1.2 Роботы, которые могут использоваться для исследования пещер

Исследование пещер естественного происхождения является комплексной задачей, сопряженная со множественными трудностями [1; 2]. Деградация сенсоров [3], перебои в коммуникации между роботами из-за потери сигналов [4; 5], сложный рельеф пещер [5], обилие грязи [6], жидких препятствий [7], требующие герметизацию корпуса, являются только малой частью встречаемых проблем в пещерах.

Для исследования пещер роботами необходимо вначале понять, что такое пещера, какие типы существуют и какие проблемы они несут. Для робототехников важно понимать типы препятствий (от этого зависит тип движителя робота), влияние окружения на алгоритмы навигации. В пещерах возможно встретить почти все типы поверхностей, с которыми приходится сталкиваться роботам в мире. Это и твердые поверхности: мрамор, кварц, базальт. Сыпучие грунты, такие как: мел, гипс, соль, известняк. Часто встречаются водные препятствия — как лужи, так и целы залы, погруженные в воду. Особую опасность для человека вносят сифоны. Это пещера в виде параболы, где в локальном минимуме все затоплено. Скользкие поверхности: лед, мох, глина, а так же разрушаемые поверхности — каменная гряда и паутина [8—11]. Все это вносит свои корректизы на выбор сенсоров. Так же важно понимать габариты пещер. Это влияет на необходимую автономность робототехнической системы [12].

Для преодоления сложного рельефа исследователи со всего мира предлагали различных роботов, робототехнические системы и типы движителей [13]. Имеет смысл рассматривать, как возможных, так и реально применяющихся для исследования пещер. Разрушение пещер нежелательно, поэтому роботы, которые для перемещения ломают породу не будут рассматриваться [14]. В пещерах принято использовать, как наземных роботов, так и летающие аппараты, так и их комплексы. Из летающего транспорта это коптеры [15—17] и дирижабли [3]. Дири-

жабль намного более автономен и может нести большую нагрузку. Наземных роботов очень много типов, но основными являются: шагающие [18; 19] колесные [4; 20], трековые [21] и необычные. Необычные это роботы, которые не поддаются классификации, например змеевидные [22; 23], шарообразные [5; 24; 25] и другие.

Но самыми эффективными являются не одинокие роботы, но системы. В данных системах появляются дополнительные задачи, как архитектурного характера, телекоммуникационного и управленического. Обычно системы состоят из нескольких одинаковых роботов [4], либо связка – коптер и шагающий [26; 27].

Отдельным пластом роботов являются ползающие роботы [28], которые рассматриваются автором как перспективные в пещерах. К сожалению, пещерные роботы были найдены только для космических пещер [29]. Крепления для шагающих роботов устанавливают во всевозможных роботов, от шагающих и колесных, до специально разработанных под ползанье. Важным критерием для успешного робота, который может перемещаться по вертикальным поверхностям является способ адгезии с поверхностью. Существуют магнитный [30–33], электрический [34][33], негативного давления [15; 30; 31], пневматический или помощью присосок [35; 36], и с помощью когтей (механическая адгезия) [29; 37–39]. Последний способ является самым применимым для пещер, так как стены очень рельефные.

Навигация в пещерах является нетривиальной задачей, поэтому необходимо рассмотреть какие сенсоры и алгоритмы, а также архитектурные решения использовались для преодоления проблем. Представленные статьи были взяты не только из прямой сферы, но также из смежных. К примеру, исследование трубопровода [40], завалов после техногенных катастроф. С точки зрения навигации основной проблемой является недостаток света, а также сильной неоднородности территории и обилия гранулированных поверхностей. На данный момент ученые мира стали стремиться решить данную проблему, благодаря проходящему соревнованию DARPA Subterranean Challenge. В данном направлении используются как лазерные дальномеры (лидары), так и визуальные SLAM алгоритмы [12; 41–43]. С точки зрения архитектуры, наблюдается тенденция к модульности, а также к возможным защитам от потерь робота [44; 45]. То есть, если робот был потерян, то остальные роботы все равно должны передавать друг другу данные. Очень важно уметь правильно передвигать робота по сыпучим грунтам, следующие работы посвящены этим проблемам. Основной критерий это решение задачи в настоящем времени [18; 40; 43; 46–50].

Целью данной аспирантской работы является разработка метода, который поможет получить информацию по поверхности пещеры. Обычно под этим подразумевается только получения типа поверхности, эти статьи и были рассмотрены [51–53].

Подведя итог, в данном обзоре были представлены причины проблем, возникающие при разведке пещер роботами. Были описаны типы пещер, рассмотрены их размеры. Представлены варианты возможных препятствий, а также сделаны выводы как это влияет на робототехническую систему. После этого показаны решения, предложенные исследователями по всему миру, связанные с навигацией, подбором движителя, выбором сенсоров и архитектурными решениями, дающие надежную систему.

### 1.2.1 Классификация шагающих машин

Данная классификация основана на [54] работе. С помощью ног могут реализовываться локомоции различных типов. *Ходьбой* называется такой тип движения машины, при котором в каждый момент времени хотя бы один механизм шагания находится в опоре. Если существуют такие моменты времени когда ни одна из ног машины не контактирует с опорой, то такие движения называются *прыжками, скачками или бегом*. Если фаза движения машины с опорой на ноги перемежается фазой покоя, в которой машина неподвижно лежит на опорной поверхности, то такое движение называется *ползанием*. Ходьба, прыжки, скачки, бег и ползание предполагают что связи ног с опорной поверхностью являются неудерживающими. Однако ноги могут быть снабжены специальными устройствами — захватами, присосками и.т.п., позволяющими аппарату реализовывать удерживающие связи с опорной поверхностью. Тип движения такого аппарата называется *лазанием*.

На основе данной классификации, разрабатываемый робот входит в состав группы "Шагающие циклового действия".

### 1.2.2 Типы мобильных робототехнических комплексов

Для работы на земле была разработана концепция *Мобильного Робототехнического Комплекса* (МРК) - совокупность программно-алгоритмических и аппаратных решений обеспечивающих комплексную автоматизацию выполнения группы поставленных задач. Предназначен для ведения войсковой разведки, огневой поддержки войсковых подразделений, охраны и обороны военных объектов, мест дислокации, установки датчиков КРСС различного типа.

### 1.3 Обзор существующих мобильных робототехнических комплексов

Мобильные робототехнические комплексы применяются при:

- боевом обеспечении спецопераций (заградительный огонь, разведка боем, разрушение заграждений и т. п.);
- проведении разведки;
- проведении взрывотехнических работ (поиск, извлечение, транспортирование и обезвреживание или уничтожение взрывоопасных предметов и неразорвавшихся боеприпасов; взрывные работы);
- обеспечении безопасности важных объектов.

По массе и основному назначению МРК можно разделить на четыре группы (Табл. 1):

- сверхлегкие, массой до 35 кг;
- легкие, массой до 150 кг;
- средние, массой до 800 кг;
- тяжелые, массой свыше 800 кг.

Таблица 1 — Классификация МРК

Группа	Назначение	Мобильность	Особенности конструкции	Оснащение
Сверх-легкие	Визуальная и акустическая разведка в помещениях и в объектах транспорта. Осмотр труднодоступных мест (днища автомобилей и т.п.) и разрушение обнаруженных СВУ.	Перевозка любым видом транспорта в контейнере-чемодане. Выгрузка оператором или доставка с помощью более тяжелых МРК к исследуемому объекту.	Шасси гусеничное, колесное или специальное комбинированное. Управление по радио, волоконно-оптической линии связи (ВОЛС) или кабелю. Питание от аккумуляторов.	1-4 малогабаритных черно-белых или цветных камеры 1-2 гидроразрушителя.
Легкие	Разведка внутри помещений и на открытой местности. Проведение взрывотехнических работ.	Перевозка легковым автомобилем с кузовом «универсал». Выгрузка вручную (2-4 чел.) или своим ходом по аппарелям. Возможна переноска на относительно небольшие расстояния.	Шасси гусеничное, колесное или специальное комбинированное. Управление по радио, ВОЛС или кабелю. Питание от встроенных аккумуляторов или от сети по кабелю до 100 м.	1-4 телекамеры. Стрела кранового или телескопического типа, либо манипулятор с 2-5 степенями подвижности. самозарядное ружье. комплексы взрывотехнического и разведывательного оборудования.
Средние	Разведка, наблюдение, охрана, проведение взрывотехнических работ. Носитель легкого стрелкового и ракетного вооружения.	Перевозка микроавтобусом или легким грузовиком. Выгрузка своим ходом по аппарелям.	Шасси гусеничное, колесное или специальное комбинированное. Управление по радио, ВОЛС или кабелю. Питание от встроенных аккумуляторов	2-4 телекамеры. Манипулятор с 2-6 степенями подвижности и сменным инструментом. Самозарядное ружье, пулемет, гранатомет, ракетная пусковая установка.

*Продолжение таблицы I*

Группа	Назначение	Мобильность	Особенности конструкции	Оснащение
Тяжелые	Разведка, наблюдение, патрулирование, проведения взрывотехнических работ. Носитель легкого пушечного и тяжелого стрелкового вооружения	Перевозка на большие расстояния специальным автотранспортом или в стандартных транспортных контейнерах. Выгрузка своим ходом или с помощью крана.	Шасси гусеничное, колесное или специальное комбинированное. Возможно использование серийно выпускаемых транспортных средств. Управление по радио, ВОЛС или кабелю;	3-4 камеры. Манипулятор с 4-6 степенями подвижности и сменным инструментом. Пулемет, ма-локалиберная автоматическая пушка. Комплекты взрывотехнического и разведывательного оборудования.

Разрабатываемый робот принадлежит к сверхлегким роботам.

### 1.3.1 Исследования с похожими роботами

Похожие роботы, такие как Boston Dynamics RHex [55], Gakken Mechamo Centipede [56], Quattroped and TurboQuad [57; 58], а так же Whegs [59] были рассмотрены. На основе данных было решено, что робот должен быть в длину меньше метра, в ширину — меньше 70 см (стандартная ширина дверного проема). Иметь меньше 32 лапок и высота лапки должна быть больше 10 см.



Рисунок 1.6 — Boston Dynamics робот RHex

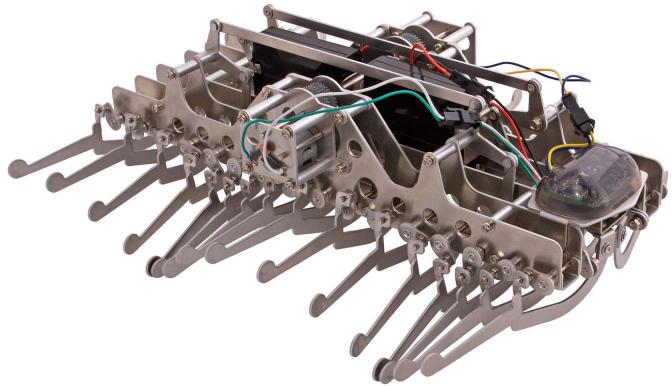
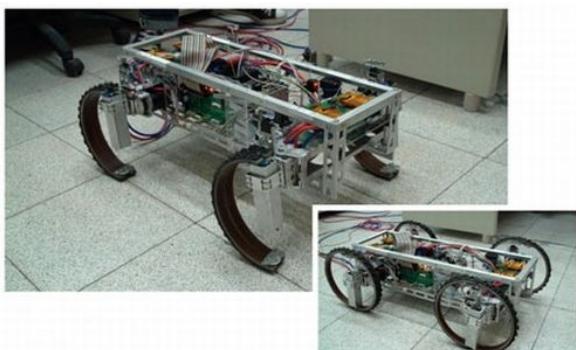
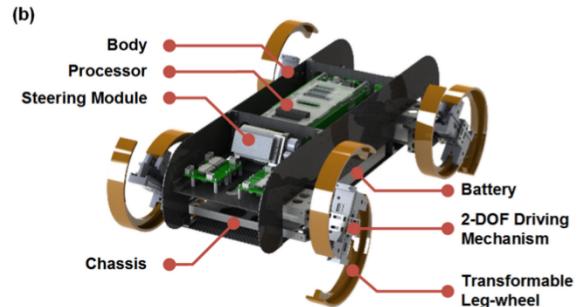


Рисунок 1.7 — Gakken Mechamo Centipede робот



а) Quattroped robot



б) TurboQuad robot

Рисунок 1.8 — Quattroped семья роботов



Рисунок 1.9 — Whegs II робот

#### 1.4 Классификация сенсорных устройств

Информация, поступающая с различных сенсорных устройств, используется в системе управления робота для обнаружения и распознавания объектов внешней среды, построения цифровой модели, а также для управления движением робота и его манипуляторов при выполнении различных технологических операций. В соответствии с этим указанные выше две группы сенсорных устройств можно описать иначе следующим образом: для выявления свойств внешней среды, отдельных объектов и обеспечения перемещения исполнительных органов.

К первой из указанных групп относятся сенсорные устройства, предназначенные для выявления различных физико-химических свойств объектов среды, включая в частности устройства для выявления параметров рельефа в рабочей зоне подвижных роботов, специальных признаков для обнаружения и распознавания определенных объектов, положения и их ориентации в рабочей зоне относительно робота и т. п.

Ко второй группе относятся датчики обратной связи (положения, скорости, ускорения), усилий, возникающих при взаимодействии робота с внешней средой, прикосновения, проскальзывания и т. д.

Такое разделение сенсорных устройств достаточно условно, поскольку, например, сенсорные устройства первой группы могут быть использованы и для определения положения захвата манипулятора робота в рабочей зоне, т. е. играть роль датчиков обратной связи при управлении движением.

Сенсорные устройства робота могут воспринимать информацию на различных расстояниях от ее источника. По этому признаку сенсорные устройства делятся на сверх ближние, ближние, дальние и сверхдальние (работающие вне рабочей зоны).

Сенсорные устройства сверх ближнего действия используют для очувствления захватов и других частей манипуляторов, а также корпуса робота. Они позволяют фиксировать их контакт с объектами внешней среды (тактильные датчики), измерять усилия, возникающие в месте взаимодействия (силометрические датчики), фиксировать проскальзывание объектов.

Сенсорные устройства ближнего действия обеспечивают получение необходимой информации в непосредственной близости от робота, но бесконтактным способом. К таким устройствам относятся локационные сенсоры захвата, неконтактные бамперы, различные дальномеры ближнего действия, измерители плотности грунта и т. п. Бесконтактные измерительные устройства технически сложнее контактных, но позволяют роботу выполнять задание с большей скоростью, заранее получать информацию о ближайших объектах и соответствующим образом корректировать свои действия. Сенсорные устройства дальнего действия дают информацию о внешней среде и объеме всей рабочей зоны робота.

Сенсорные устройства сверхдальнего действия применяют главным образом в подвижных роботах. К таким устройствам относятся различные навигационные устройства, координаторы, локаторы и другие оптические, радиотехнические и телевизионные системы.

В бесконтактных сенсорных системах роботов для получения требуемой информации могут быть использованы излучаемые таким устройством специальные сигналы (оптические, радиотехнические, радиационные и т. п.) или естественные излучения среды и отдельных ее объектов. В зависимости от этого различают активные и пассивные сенсорные системы. Первые обязательно включают передающие устройства, излучающие первый сигнал, и приемные устройства, регистрирующие прямой сигнал, прошедший через среду, или вторичный сигнал, отраженный от объектов среды. Пассивные системы имеют только приемное устройство, а роль излучателя играют сами объекты внешней среды. Поэтому такие устройства технически обычно проще и дешевле, но зато и менее универсальны. Существуют также полуактивные сенсорные устройства, в которых в результате излучения внешней среды инициируется вторичное излучение ее объектов, принимаемое приемными устройствами, как в пассивных системах.

Таким образом на основе классификации, решено выбрать силомоментные датчики для решения поставленной задачи.

## Глава 2. Оптимизация конструкции робота

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

### 2.1 Решение задачи структурного синтеза

Для эффективного исследования пещер необходимо выставить требования к разрабатываемому роботу. На основании литературного обзора было решено, что робот должен:

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.

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.

Для создания подходящего робота, который может эффективно решать конкретные задачи, необходимо провести структурный синтез. Это означает, что мы оптимизируем такие характеристики робота, как количество ног, угол между ногами и т.д., используя алгоритмы оптимизации. Обычно в алгоритмах оптимизации оптимизируется фитнес или объективная функция.

При оптимизации очень важно выбрать подходящую функцию пригодности. Иногда эта функция может быть явно выражена через аналитическую формулу: например, выражение общего материального объема робота как функции его геометрических параметров. Однако в других случаях желаемая мера эффективности не может быть вычислена в явном виде и может быть получена только с помощью физического эксперимента или соответствующего моделирования. В нашем случае мы стремимся максимизировать ходовые качества робота на различных сложных участках, и основным используемым показателем будет проходимость местности. Таким образом, мы автоматически создадим симулированные версии нашего робота, используя различные варианты параметров проектирования, а также симулированные версии различных типов местности: а затем мы оценим пригодность робота для ходьбы с помощью физической симуляции, во время которой робот будет проходить по местности. Также были получены параметризации различных генеративных моделей местности, чтобы мы могли на более позднем этапе исследовать влияние не только типа местности, но и параметров местности на возможность появления многоножек, и, следовательно, на лучшие конструкции в зависимости от конкретной местности.

Для того чтобы направлять процесс поиска в пространстве возможных значений параметров, мы решили использовать модифицированный эволюционный алгоритм, который создает последовательные поколения конструкций с помощью соответствующих генетических операторов, играющих роль мутаций и скрещивания. После нескольких инициализаций и поколений были получены многообещающие результаты и полезные идеи, которые позволили нам создать конструкции, значительно улучшающие производительность, для достижения нашей конечной цели - многоножек, способных преодолевать сложные участки местности. Такие работы необходимы во многих областях применения, включая поиск и спасение (ходьба по обломкам разрушенных зданий), преодоление неровных скалистых и горных местностей для мониторинга окружающей среды и логистики, и многое другое.

Полный текст статьи можно прочитать [[60](#)].

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. 2.1).

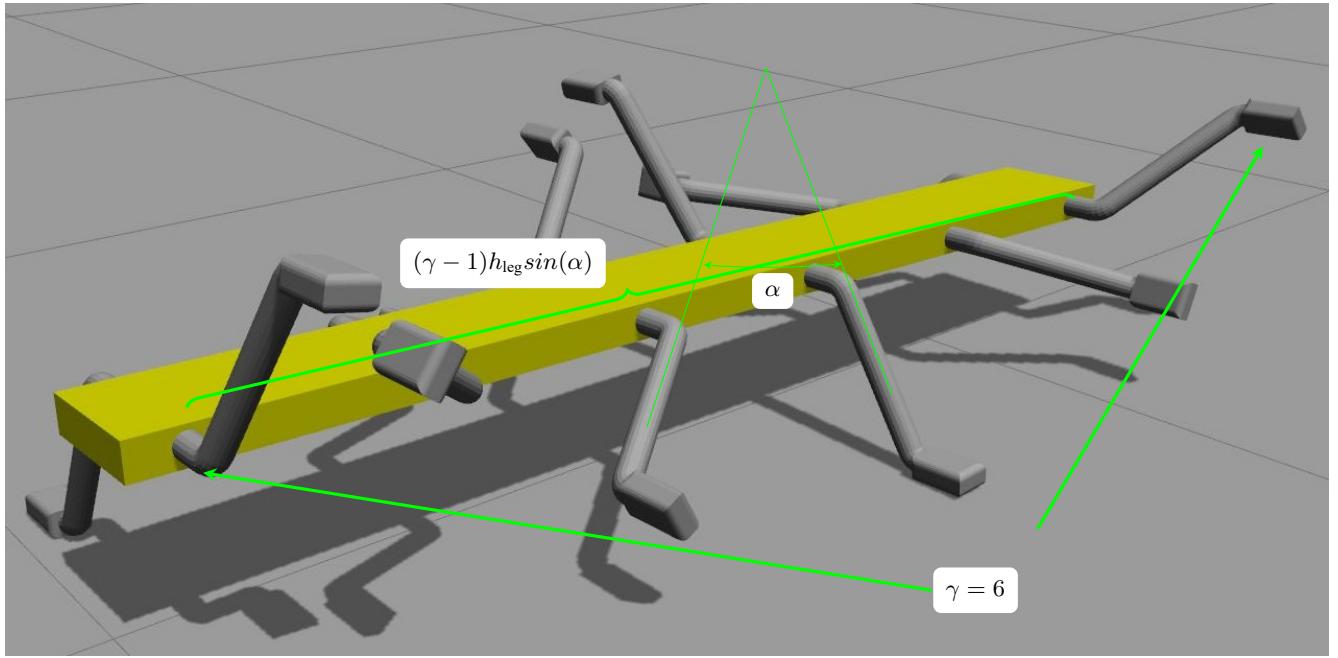


Рисунок 2.1 — Схема модели робота для генетического алгоритма

Эту задачу можно сформулировать как мультикритериальную задачу оптимизации, где необходимо максимизировать дистанцию, пройденную за фиксированное время, и минимизировать длину робота (2.1). Параметрами индивида являлись  $\gamma$  и  $\alpha$ .

$$F \rightarrow \max = \beta \left( \underbrace{\omega_1 \cdot \delta}_{\text{Distance}} + \omega_2 \cdot \underbrace{\frac{1}{(\gamma - 1)h_{\text{leg}}\sin(\alpha)}}_{\text{Simplified body length}} \right) + (1 - \beta)\delta^{\omega_1} \left( \frac{1}{(\gamma - 1)h_{\text{leg}}\sin(\alpha)} \right)^{\omega_2} \quad (2.1)$$

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

Модель робота должна быть реализована в формате URDF. Это язык разметки формата XML для представления модели робота. Но это старый формат, и когда модель импортируется в Gazebo, URDF преобразуется в формат SDF. Это важно, потому что некоторые функции не реализованы в чистом URDF. В нашем случае это шарнир коробки передач. Но можно вставить код в формат SDF, и он будет работать правильно.

### 2.1.1 Генерирование местности, над которой будет проходить робот

В основе нашего решения лежит пятый подход (представленный в справочном разделе данной работы). Параметры местности, которые могут быть изменены, следующие:

- номер ширины и длины клетки;
- диапазон высоты клетки начало и конец;
- ширина и длина клетки;
- 2(3) измерения местности (рис. 2.5а);
- параметр распределения (рис. 2.5б).

Для выбора высоты клеток были проведены эксперименты. Существует 3 диапазона, определяющих свойства местности, которые изображены ниже (рис. 2.2).

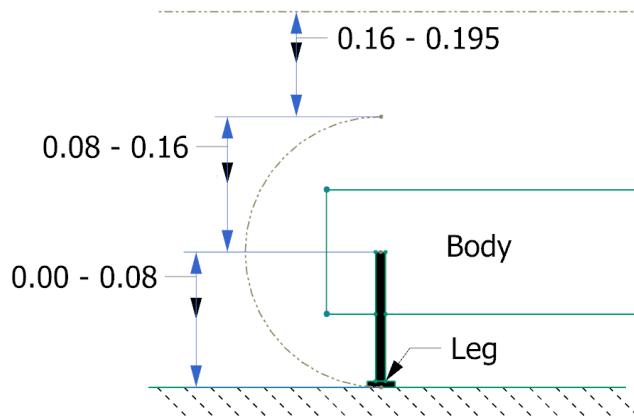


Рисунок 2.2 — Три диапазона для оценки рельефа местности

Для каждого полигона было сгенерировано 20 местностей и 50 роботов. Каждый робот пытается пройти все местности. У робота есть 4 секунды моделирования и он пытается пройти первое препятствие. Успешные попытки засчитывались. Результаты можно увидеть в таблице 2.

Таблица 2 — Процентное соотношение между диапазонами и успешными попытками

Range	Percentage
0.00 – 0.08	99.7
0.08 – 0.16	79.7
0.16 – 0.195	47.3

Таким образом, было решено, что второй & первый диапазоны (0.00 - 0.16) будут использоваться в алгоритме оптимизации, чтобы иметь дело со среднежесткими грунтами.

В информатике генетические алгоритмы - это адаптивные эвристические алгоритмы поиска, основанные на эволюционных концепциях. Они представляют собой интеллектуальную параллельную эксплуатацию пространства проектирования и могут быть использованы для решения проблем оптимизации, не обязательно оптимизируя, но часто получая близкие к оптимальным решения.

Была выбрана библиотека Deap [61], поскольку в ней есть все необходимые инструменты для реализации поставленной задачи.

После случайной генерации начальной популяции, алгоритм эволюционирует с помощью трех операторов:

1. Selection (основанный на повышенной вероятности выживания сильнейшего);
2. Кроссинговер (который представляет собой спаривание между особями);
3. Мутация (которая вносит случайные изменения).

Оператор Selection был взят из библиотеки Deap. Он использует турнирный подход. Однако в библиотеке Deap мы написали собственные реализации кроссинговера и мутации:

1. Crossover: мы используем общую функцию с некоторыми дополнениями. Каждая особь имеет 4 поля, но четвертое поле (расстояние) зависит от других полей. Поэтому наша функция кроссинговера должна работать только с первыми тремя характеристиками.
2. Mutation: Аналогично Crossover, здесь мы работаем только с тремя полями: количество ног, угол между двумя соседними ногами и волновое

смещение между сторонами. Наша модель имеет ограничения по максимальной длине и т.д., поэтому с некоторой заданной вероятностью каждая из характеристик может быть изменена в определенном интервале. Мутация может произойти один или два раза, но вероятность уменьшается. Это означает, что если произошла первая мутация, то вероятность для этой особи становится ниже.

Этот псевдокод дает высокоуровневое описание всего алгоритма.

**Input:**  $\alpha$  – number of generations,  $\beta$  – number of individuals,  $\gamma$  – number of terrains

**Output:** Good enough parameters for robot

**begin**

```

generate set of terrains;
randomly initialize a first population of robots;
for  $i = 0$  to  $\alpha$  do
    for  $j = 0$  to  $\beta$  do
         $distance = 0;$ 
        for  $k = 0$  to  $\gamma$  do
            start simulation;
             $distance += cur\_distance;$ 
        end
         $avg\_distance = distance/\gamma;$ 
        evaluate fitness function;
    end
    select the best parents;
    perform crossover on chosen parents;
    perform mutation;
end

```

**end**

**Algorithm 1:** Верхеуровневый генетический алгоритм

Результаты были получены на двух этапах. На первом этапе мы стремились найти только одного лучшего робота, только для местности T1. На втором этапе мы хотели увидеть зависимость производительности от повторной инициализации эксперта, и, что самое важное, от различных типов местности.

Первая фаза: Каждый робот прошел 10 различных рельефов и потратил на каждый по 9 секунд. В результате нашей работы мы получили следующие результаты: после 11 поколений и 200 особей в начальной популяции лучший робот имеет по 6 ног с каждой стороны (всего 12 ног), угол между ногами 73 градуса и волновое смещение между сторонами 163 градуса. С такими характеристиками робот смог пройти 5,21 метра, в то время как начальная популяция могла пройти менее 2. На рисунке ниже (Рис. 2.3) показан лучший робот, найденный на первом этапе. На следующем рисунке (Рис. 2.4) показаны траектории улучшения приспособленности для первой фазы экспериментов, показывающие приспособленность  $\text{max}$ ,  $\text{min}$ ,  $\text{avg} + \text{std}$ ,  $\text{avg} - \text{std}$ , в разных поколениях.

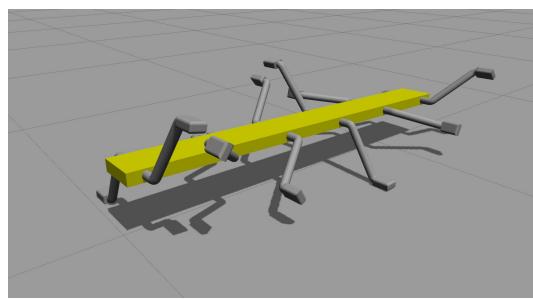


Рисунок 2.3 — Робот с результирующими результатами

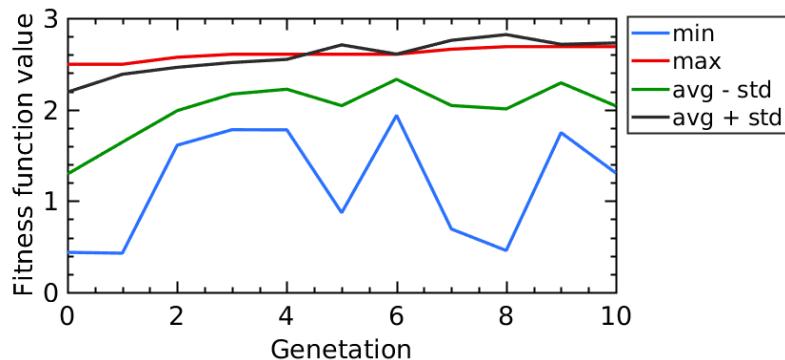


Рисунок 2.4 — Среднее значение фитнес-функции  $\pm \text{std}$  на поколение Минимальное и максимальное значения фитнес-функции на поколение

Вторая фаза: Для каждого из трех типов местности используются следующие параметры:

- 11 поколений;
- 55 особей;
- 10 различных местностей и 9 секунд;
- 9 секунд на каждой местности.

Весовые коэффициенты настраивались в зависимости от выбора приоритета. Невзирая на выбранные коэффициенты, оптимальным набор ног начинался

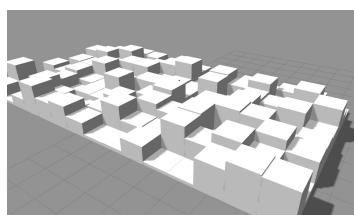
с 8 и заканчивался 14. Это объясняется критерием статического равновесия, который, как оказалось, увеличивает проходимость механизма. В данном случае 4 ноги всегда будут касаться пола.

Было проведено два испытания. На первом испытании мы стремились найти только одного лучшего робота, только для местности T1 (Рис. 2.5а). На втором этапе мы хотели видеть зависимость от разных типов ландшафтов при меньшем количестве индивидуальностей.

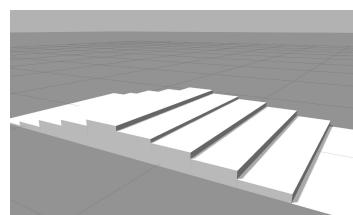
Первый этап: каждый робот проходил 10 разных ландшафтов по 9 секунд каждую. Вторая фаза: она имеет те же параметры, что и первая фаза, но с измененным размером популяции.

В соответствии с таблицей 3 (весовые коэффициенты равны 0.6 и 0.4 соответственно) видно, что мы имеем сходимость в параметрах. Видео прохождения

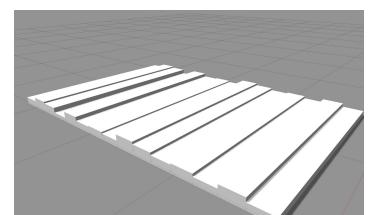
препятствия лучшим индивидом



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



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



в) T3: 2D-полосы с  
гауссовской функцией

Рисунок 2.5 — Примеры сгенерированных территорий

Таблица 3 — Зависимость между статистикой значения пригодности и типами ландшафта

Территория, популяция	Параметры	Среднее значение	Std целевая функция
T1 (Рис. 2.5а), 110	(6, 72)	2.38	0.34
T2 (Рис. 2.5б), 55	(5, 68)	1.95	0.35
T3 (Рис. 2.5в), 55	(6, 77)	2.08	0.33

## 2.2 Решение задачи на основе кинематики

Этот тип робота имеет некоторые проблемы, одна из которых - колебания. В результате управление становится сложным и неточным. Поэтому, чтобы преодолеть эту проблему, мы можем частично решить ее путем изменения угла между соседними ногами.

Далее следует наша целевая функция. Мы должны максимизировать положение Z и минимизировать STD. Одновременно мы должны минимизировать RMS и std углы в обоих направлениях (крен и тангаж). Важным моментом является и направление движения.

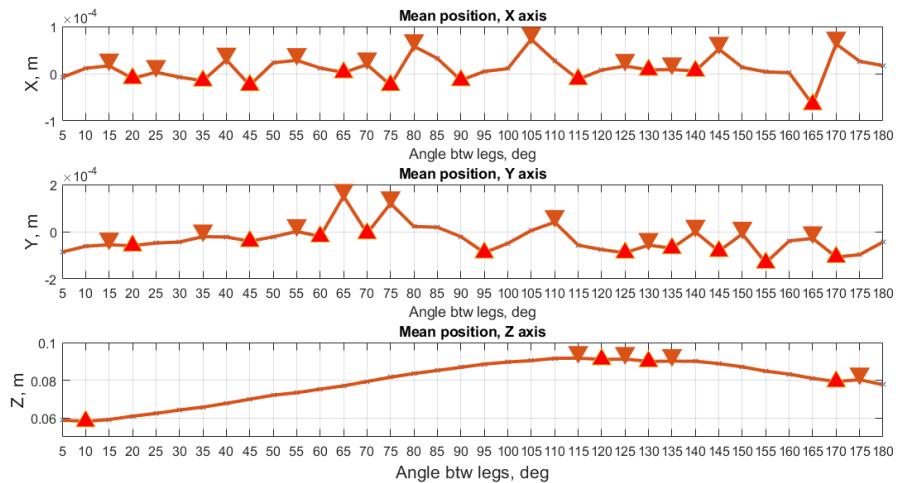
Объективная функция имеет следующий вид:

$$F = \sum_{i=1}^4 \omega_i \cdot \left( \frac{1}{\omega_{z1}Z_{rms}^i - \omega_{z2}Z_{std}^i} + (\omega_{p1}\alpha_{rms}^i + \omega_{p2}\alpha_{std}^i) + (\omega_{r1}\beta_{rms}^i + \omega_{r2}\beta_{std}^i) \right) \rightarrow \min \quad (2.2)$$

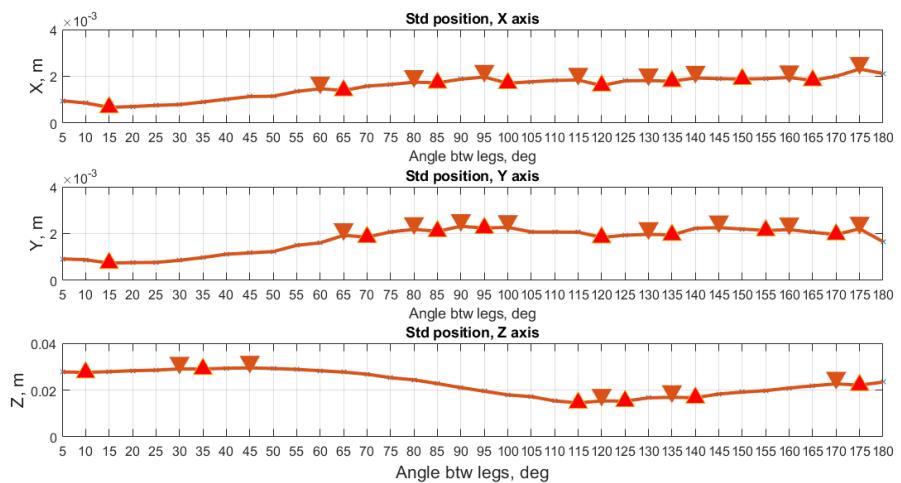
где надпись  $i = \{1,2,3,4\}$  – среднее значение а, которое принимается из 1 - движение вперед, 2 - движение влево, 3 - движение вправо, 4 - вращение ;  $Z$  – положение по оси Z ;  $\alpha, \beta$  – значения ориентации по крену и шагу ;  $\omega_i$  – весовой коэффициент для каждого направления ,  $\omega_{z,roll,pitch}$  – весовые коэффициенты .

В нашем случае мы можем просто найти все возможные решения за неподходящее время, потому что нам нужно только проверить 36 углов · 4 направления · 100 экспериментов для каждого направления · 144 шага в каждом.

Есть пример, который описывает два возможных движения: вперед и скольжение. Результаты о положении почти одинаковы для обоих типов, и я сделал рисунок только для движения вперед.



a) Среднее значение из данных о положении для обоих типов движения



б) STD из данных о положении для обоих типов движения

Рисунок 2.6 — Данные о положении для обоих типов движения

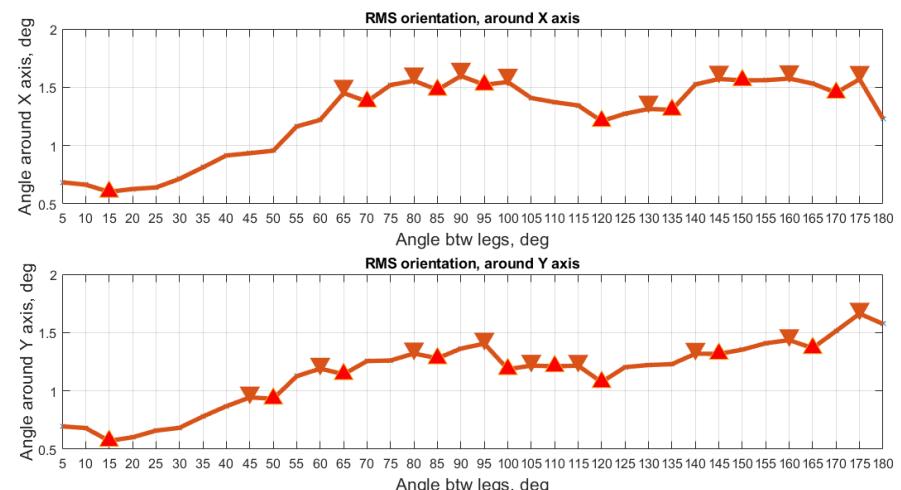


Рисунок 2.7 — RMS из данных об ориентации для типа движения вперед

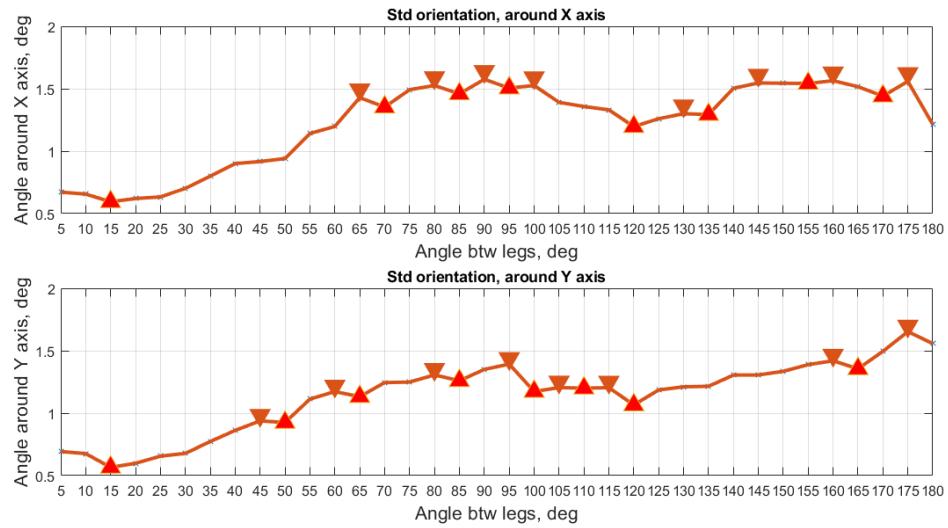
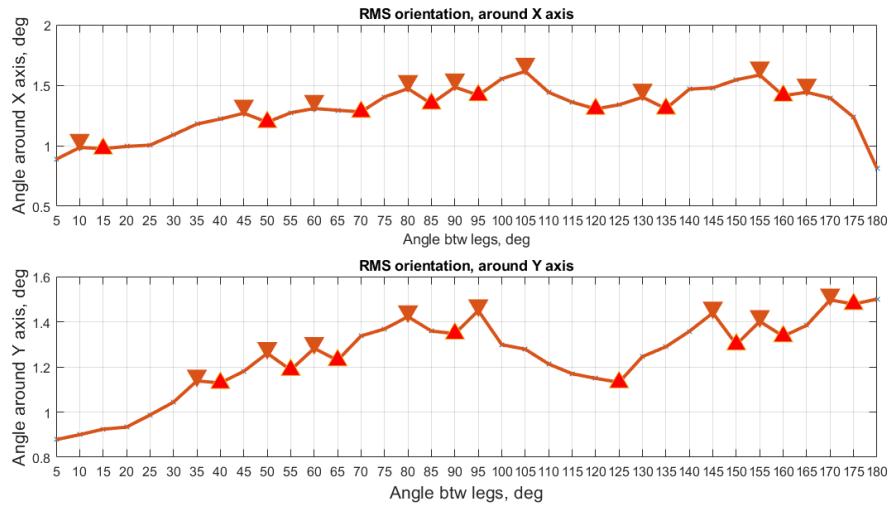
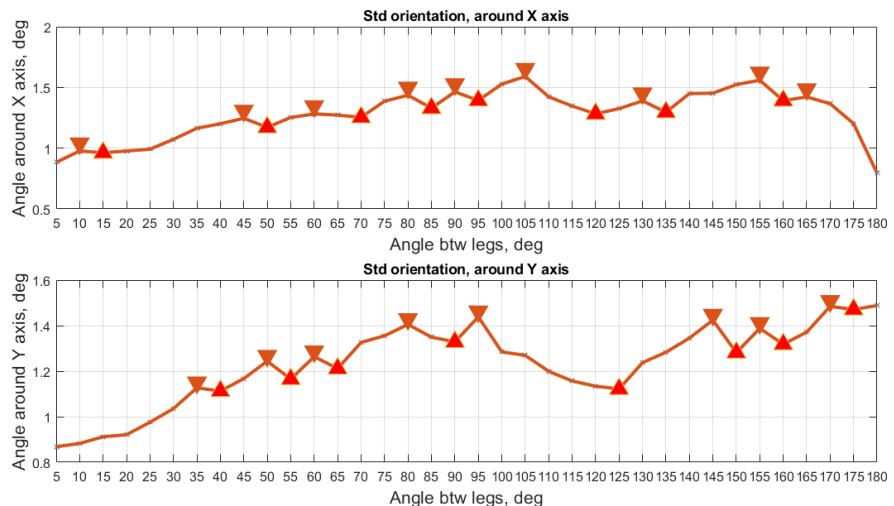


Рисунок 2.8 — STD из данных об ориентации для типа движения вперед



a) RMS из данных об ориентации для типа движения вбок



б) STD из данных об ориентации для типа движения вбок

Рисунок 2.9 — из данных об ориентации для типа движения вбок

В результате работы мы получили угол между ногами 120 градусов. Это можно объяснить, потому что это периодическая функция, а обычно этот тип функций дает подходящие результаты.

### 2.3 Разработка движителя

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.

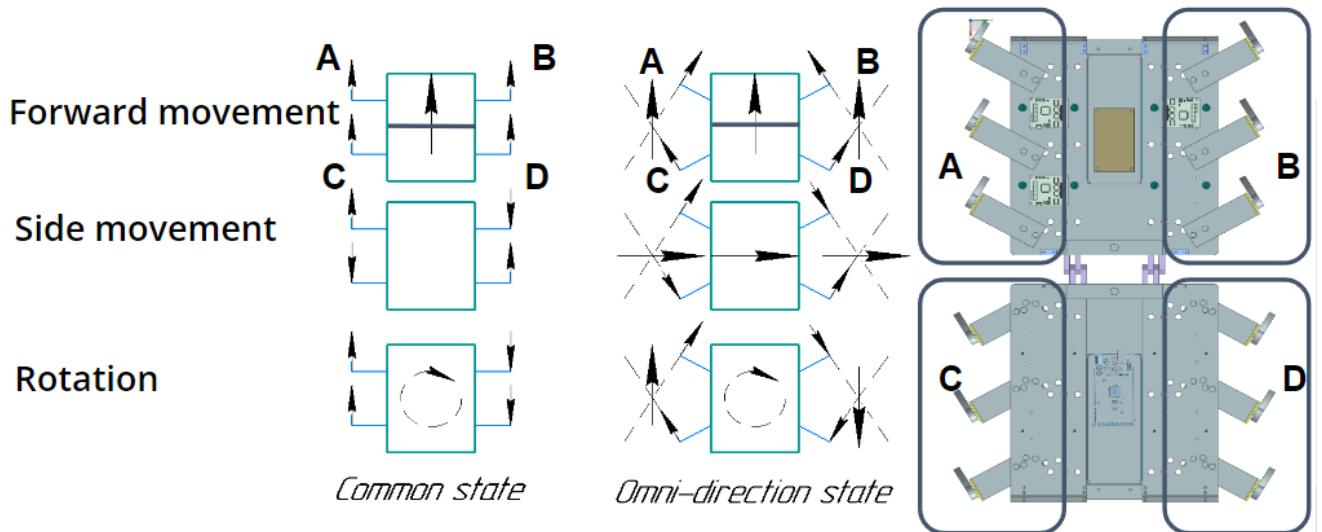


Рисунок 2.10 — Векторное представление сил в классическом и всенаправленном состоянии

На рисунке 2.10 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. 2.10. 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. 2.10 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 противополож-

ную. Правая часть рисунка иллюстрирует расположение групп ног на исследуемом роботе.

В рамках исследования было разработано четыре концепции робота Стри-Рус. В таблице 4 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.



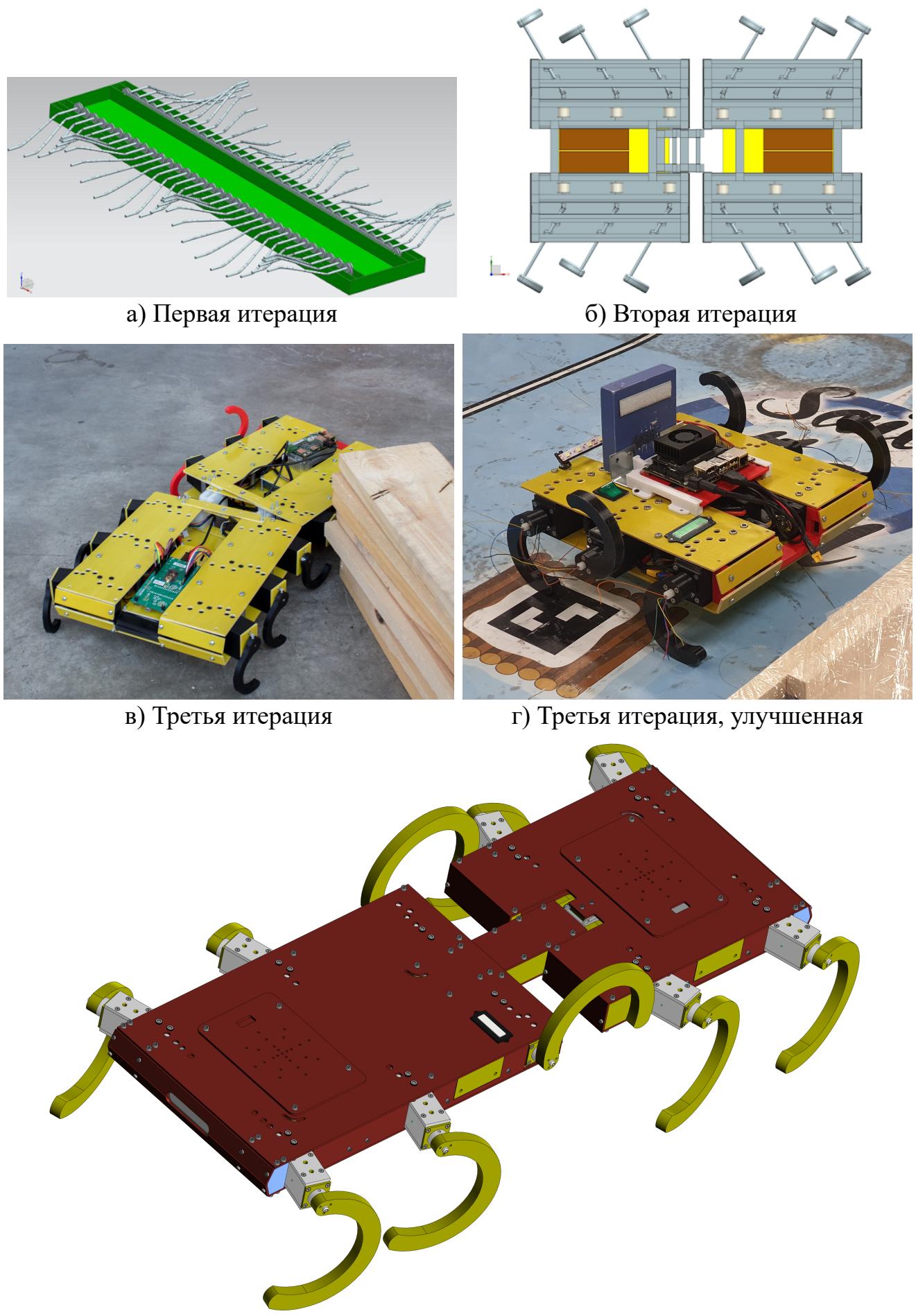


Рисунок 2.11 — Итерации робота СтриРуса

Таблица 4 — Сравнение итераций робота

Итерация	1 <a href="#">(Рис. 2.11а)</a>	2 <a href="#">(Рис. 2.11б)</a>	3 <a href="#">(Рис. 2.11в)</a>	3+ <a href="#">(Рис. 2.11г)</a>	4 <a href="#">(Рис. 2.11д)</a>
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	Двухстепенной узел, соединяющий сегменты	Большие ноги	Гигантские ноги
Недостатки	Невозможно установить сенсоры на ноги. Много подвижных частей	Слишком сложный механизм, изменяющий 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 мультикри-териальной 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.

## Глава 3. Разработка и исследование преобразователя силы на основе Velostat

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

Существует несколько типов датчиков, которые могут измерять контактные силы и распределение давления. Одним из способов его использования является область робототехники. В обнаружении формы поверхности. Существует класс роботов (RHEX, Strirus), которые обладают такими параметрами.

Наиболее плодотворным местом для использования ножных роботов является неровная местность, например, пещеры. Обычная пещера состоит из твердых и скользких поверхностей, ходовых грунтов. Для работы в таких местах робот должен получать информацию о физических свойствах местности. Эта информация оказывает существенное влияние на эффективность и стратегии локомоции. Например, на зернистой или травянистой местности взаимодействие между ногами и землей может привести к резкому рассеиванию энергии из-за трения. Это происходит из-за деформации поверхности ногами. Знание этой информации о взаимодействии ноги с землей может быть использовано для управления адаптацией.

Имея подробную информацию о взаимодействии ноги-земля, мы можем решить множество задач, таких как идентификация местности [62—65], управление походкой на основе рельефа местности [66; 67], анализ устойчивости и SLAM [68—70]. Решение этих задач может значительно повысить проходимость и возможности исследования мобильных роботов.

Для решения задач упоминания могут быть использованы различные датчики. Это могут быть инерциальные измерительные приборы (IMU), ток от двигателей, датчики силы, звук, системы технического зрения [69; 71; 72]. Ценные результаты были получены при использовании датчиков силы. Следовательно, применение их в нашей системе является правильным решением.

Существует несколько типов датчиков, которые могут измерять контактные силы и распределение давления. Это могут быть оптические, пьезорезистивные, пьезоэлектрические, магнитные, емкостные, на основе оптических волокон [73]. Промышленные датчики момента силы (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 [74—76]. Та же

проблема применима к оптическим и магнитным датчикам. Емкостные датчики требуют высокой точности изготовления. В итоге, пьезорезистивный датчик был выбран как наиболее подходящий.

Самый популярный тип пьезорезистивного датчика - тензодатчик. Он может быть установлен на ногах робота, но это решение требует наличия цепей формирования сигнала и создает трудности при прокладке проводов между постоянно вращающимися ногами и корпусом робота [66]. Другой способ - использовать пьезорезистивные датчики на основе проводящих волокон или полимеров. Они недорогие, очень гибкие и компактные. К сожалению, одной из распространенных проблем является значительный гистерезис. Мы решили использовать Velostat (Linqstat)[77] в качестве промежуточного слоя для резистивного датчика.

Velostat - это проводящее волокно, которое обладает вязкоупругим поведением. Это резко влияет на отклик датчика. Этот материал обладает свойствами квантового туннелирования и предварительной локализации.

В результате мы решили разработать и изготовить пьезорезистивный датчик на основе Velostat. Такой датчик поможет нам решить проблемы классификации местности и создания карт на биомиметическом многоножном роботе StriRus.

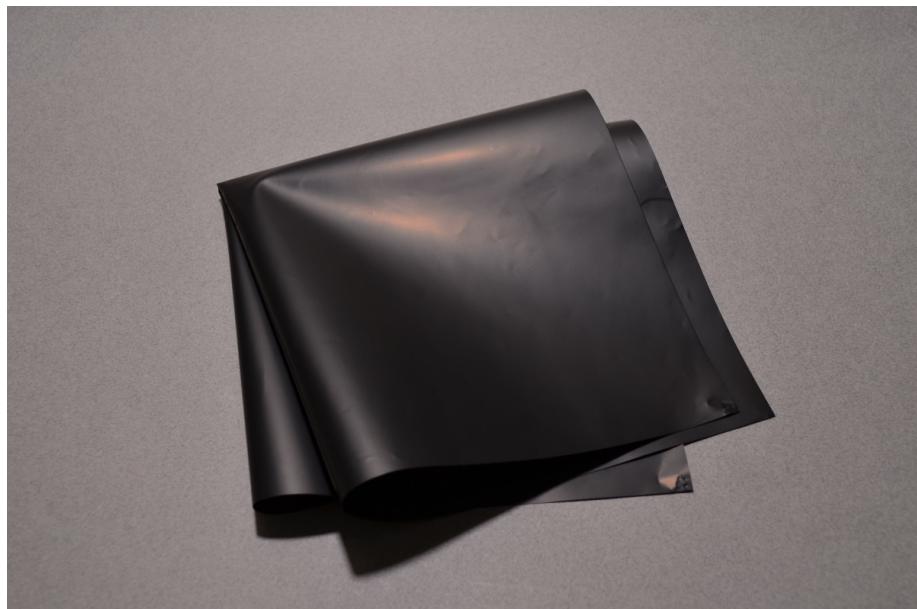
Для использования такого датчика необходимо оценить его поведение. Например, мы выяснили, что если прикоснуться к датчику два раза с одинаковой силой в разных местах, то результат на выходе будет отличаться в два раза. Чтобы понять, как с этим работать, нам нужно сформулировать и смоделировать сценарии использования.

В представленной работе используется материал Velostat (Linqstat) (Рис. 3.1a) в качестве промежуточного слоя для датчика (Рис. 3.16).

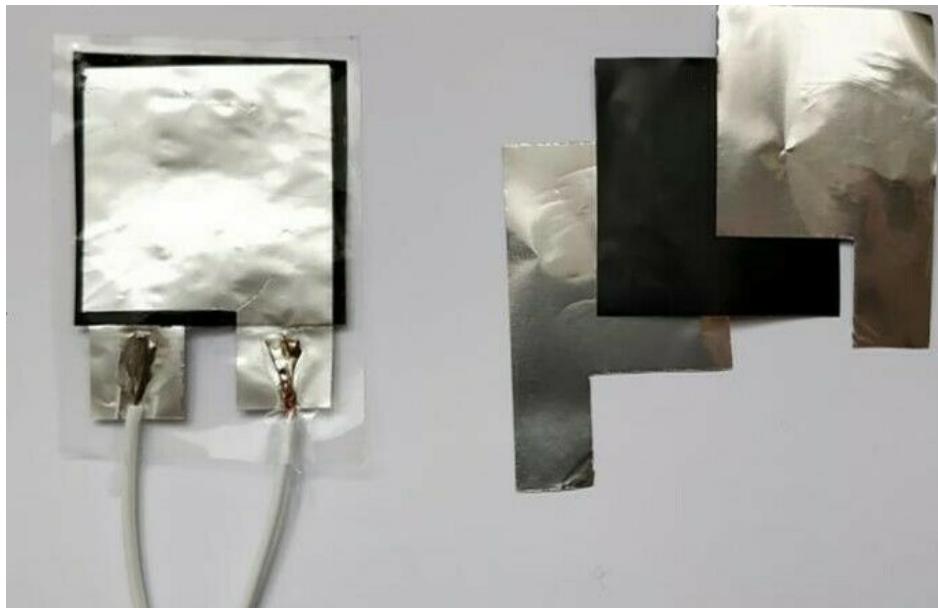
При исследовании преобразователя силы на основе Velostat, было замечено, что площадь нажатия влияет на показания преобразователя. Поэтому было решено характеризовать материал для случаев, когда нагрузка меньше, чем размер сенсора.

### **3.1 Физическая реализация преобразователя силы на основе Velostat**

Датчик состоит из двух медных оболочек, разделенных слоем велостата. Велостат - это упаковочный материал, изготовленный из полимерной пленки (поли-



а) Материал Velostat



б) Простейший преобразователь силы на основе Velostat

Рисунок 3.1 — Примеры использования Velostat

олефины), пропитанной сажей для придания ей электропроводности. Он используется для защиты предметов или устройств, которые могут быть повреждены электростатическим разрядом. Свойство изменять свое сопротивление при изгибе или давлении делает его популярным решением для изготовления недорогих датчиков давления.

Датчик состоит из двух медных оболочек, разделенных слоем Velostat. Давление на датчик приводит к изменению его сопротивления: чем выше давление, тем ниже сопротивление. Сопротивление измеряется косвенным методом. Изме-

ренное сопротивление Velostat образует делитель напряжения с постоянным резистором R1...R8 (Рис. 3.2).

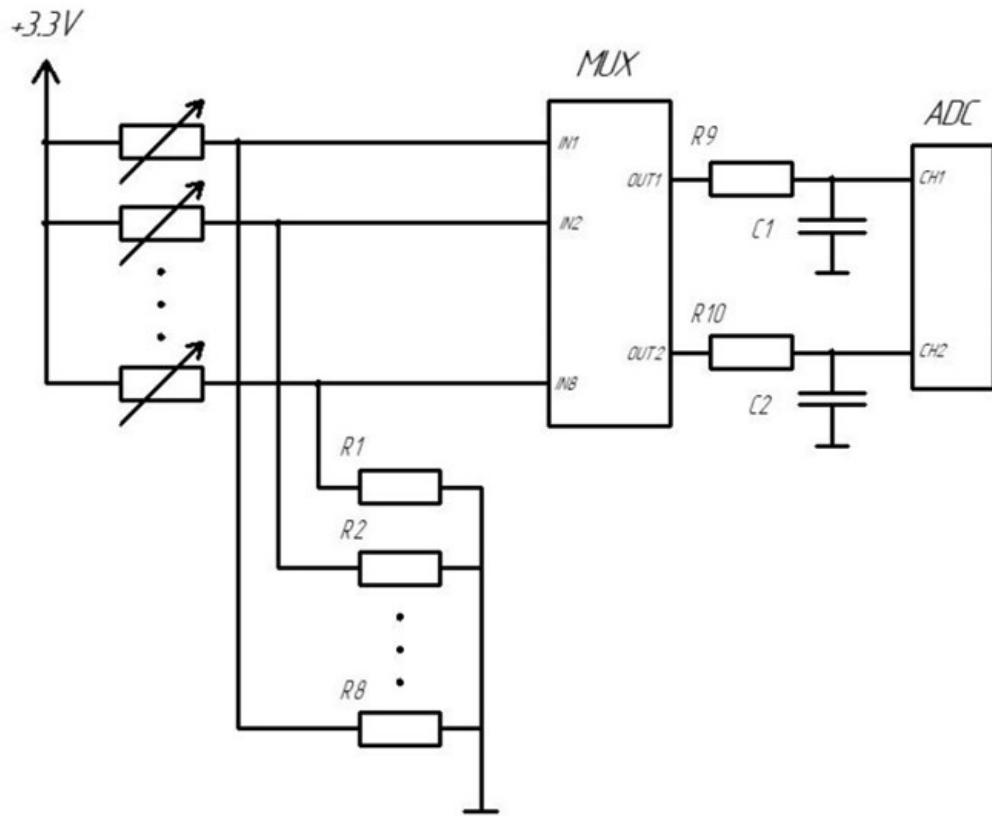


Рисунок 3.2 — Электрическая схема преобразователя силы

На одну из пластин датчика подается напряжение 3,3 вольта. Таким образом, когда давление на датчик отсутствует (в идеальном случае сопротивление стремится к бесконечности), напряжение на выходе делителя стремится к нулю. По мере увеличения давления сопротивление будет уменьшаться, и напряжение на делителе будет приближаться к напряжению питания.

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. 3.3) показана рабочая область сенсора, основанная на весе, который может быть приложен на одну ногу робота.

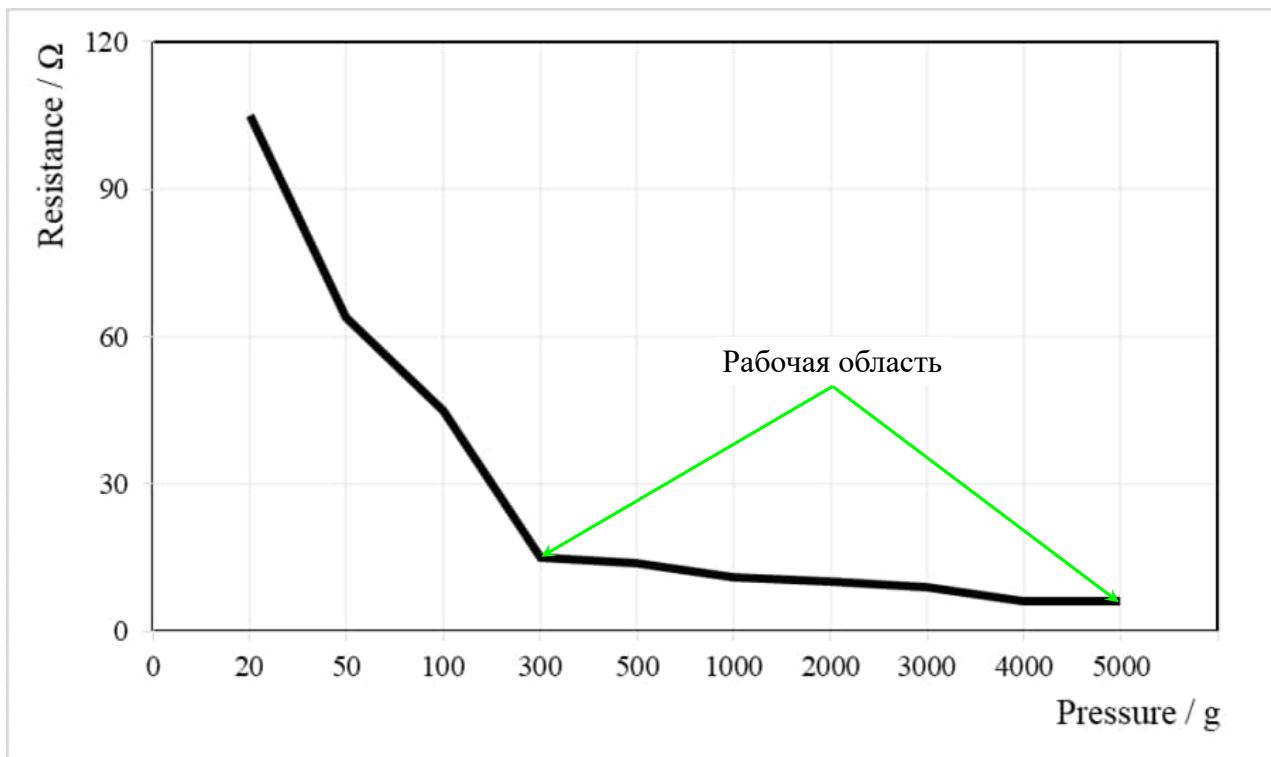


Рисунок 3.3 — График зависимости прикладываемого веса от сопротивления

### 3.2 Разработка экспериментального стенда

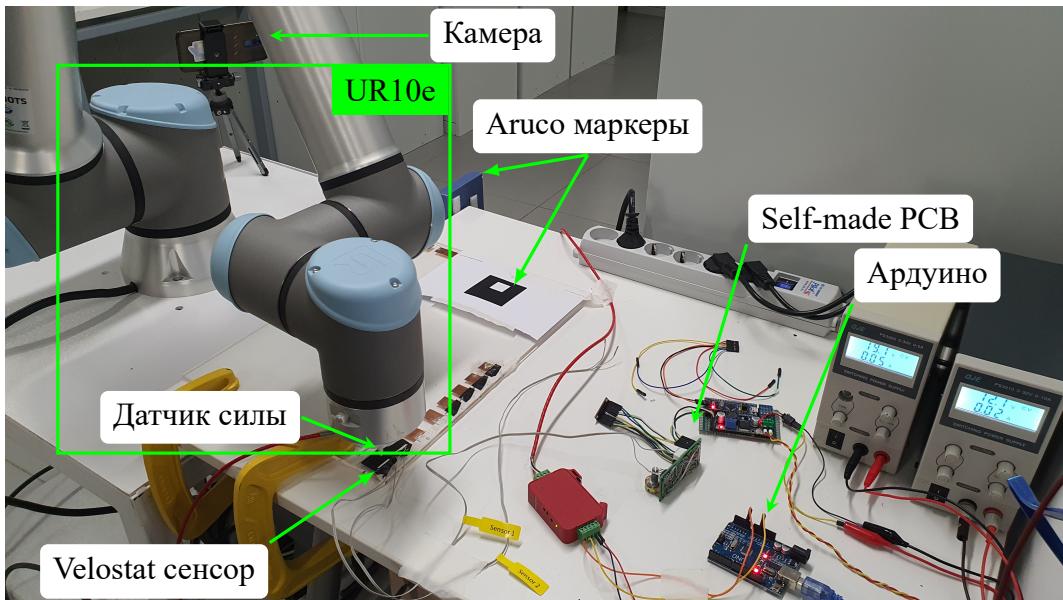
Исследования преобразователя Velostat, для случаев которых площадь нагрузки меньше, чем размер преобразователя, были проведены с помощью разработанного для этой цели исследовательского стенда. Среди требований к стенду можно отметить: необходимость контролировать силу нажатия и повторяемость эксперимента 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 3.4а.

Видео работы стендса



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



а) Общий вид экспериментального стенда

б) Способ нивелировать ошибку по углу  
с помощью Aruco маркеров

Рисунок 3.4 — Разработанный экспериментальный стенд

взято за 2 мм. А длина ребра датчика – 15 мм. Поэтому 15 мм концевой инструмент является максимальным (Рис. 3.5а).

Импедансное управление состоит из двух блоков – модификация траектории для оси  $z$ , начиная с (3.1), и управление по скорости – с (3.7).

$$X_s^0 = 0, \dot{X}_s^0 = 0, X_g^k, \dot{X}_g^k - \text{goal state}, X_s = X_g - X_d \quad (3.1)$$

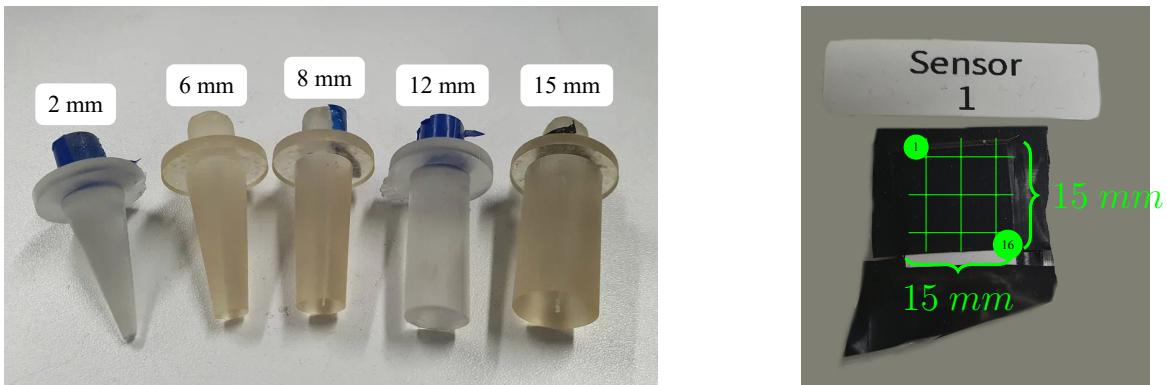
$$X_g = X_g^0 + \frac{F_d}{\eta} \quad (3.2)$$

$$\dot{X}_s + \eta X_s = F^k \quad (3.3)$$

$$X_s^k = \text{odeint}(X_s^{k-1}, t, F^k), t = [0, dT] \quad (3.4)$$

$$X_s^{k-1} = X_s^k; \dot{X}_s = f(X_s, t, F^k) \quad (3.5)$$

$$X_d = X_g - X_s; \dot{X}_d = \dot{X}_g - \dot{X}_s \quad (3.6)$$



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

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

Рисунок 3.5 — Представление места нажатия инструментом сенсора и сам инструмент

$$X_d = \begin{bmatrix} x_g \\ y_g \\ z_d \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

$$\dot{U} = X_d + K(X_d - X), \quad (3.8)$$

where  $X = \text{get\_state}();$  (3.9)

$\text{set\_speed}(U)$  (3.10)

На рисунке ниже (Рис. 3.6) представлен результат работы импедансного управления на частоте 450 Hz. Необходимая сила нажатия — 17 H.

### 3.3 Экспериментальная часть

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;
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

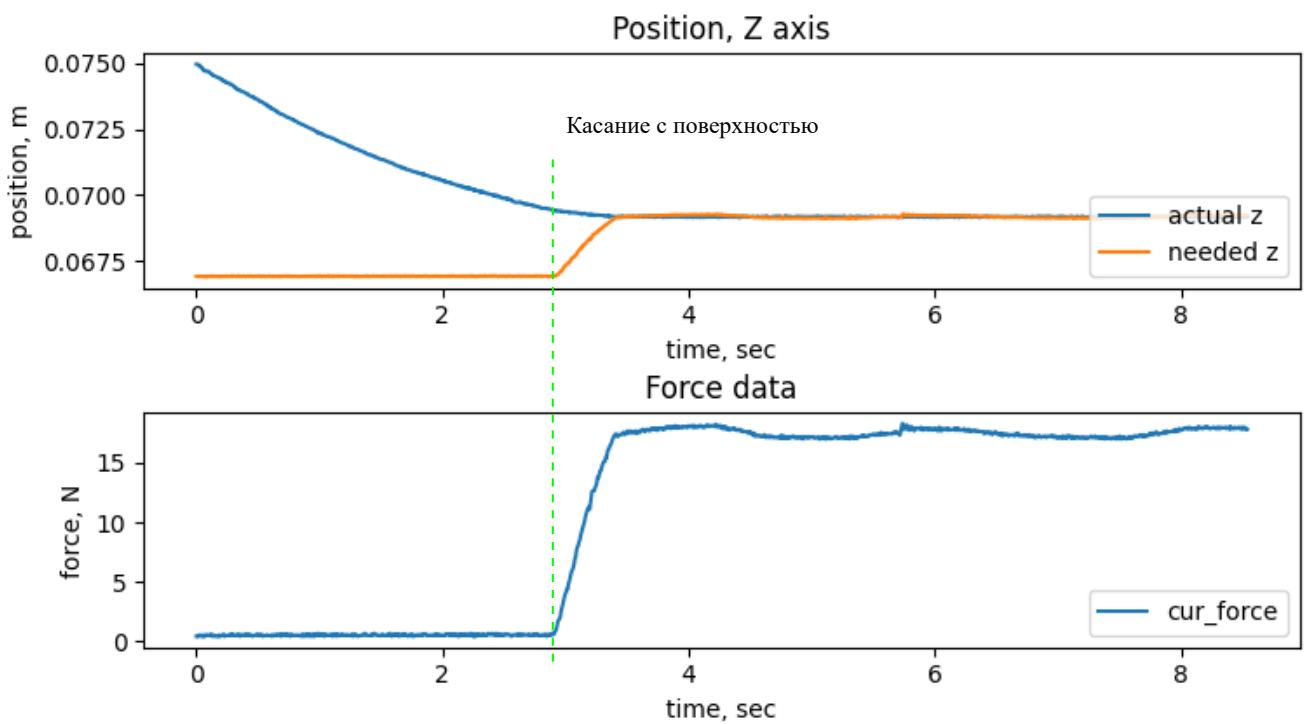


Рисунок 3.6 — Графики зависимости силы и позиции по  $z$  от времени во время эксперимента по исследованию Velostat

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. 3.56).

Статическим экспериментом проверялась формула (3.11). Из-за гистерезиса необходимо учитывать время нажатия на объект. При прикладывании на сенсор константной нагрузки показания сенсора будут меняться.

$$V_{out} = V_0 + p[k_p + k_e(1 - e^{-\frac{(t-t_0)}{\tau_{res}}})](1 - e^{-\frac{A}{p}}) \quad (3.11)$$

$$k_p = A_1 e^{-A_2 p}; \tau_{res} = B_0 + B_1 e^{-\frac{p}{B_2}} \quad (3.12)$$

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. Результат представлен ниже (Рис. 3.7).

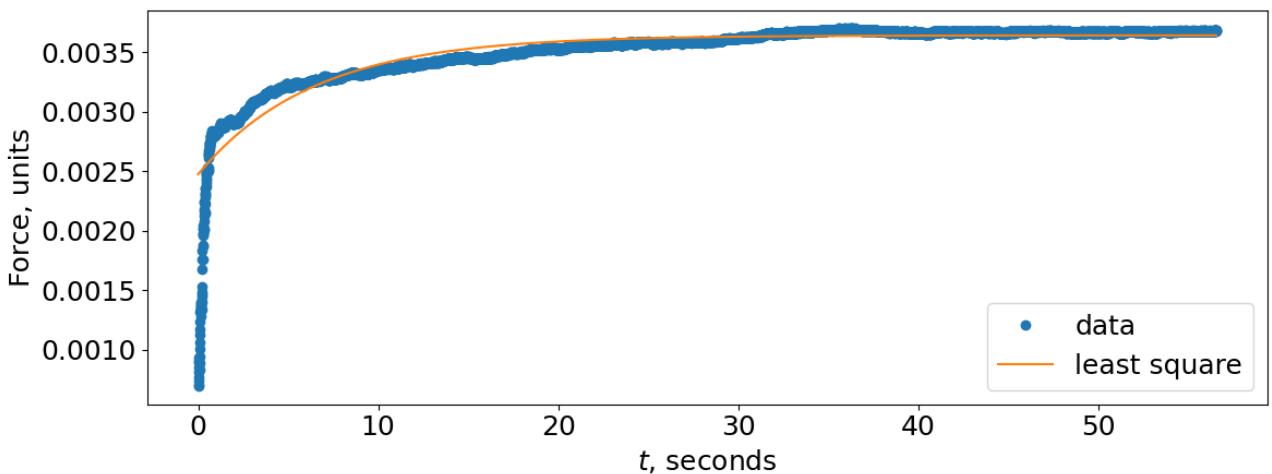


Рисунок 3.7 — Результаты статического эксперимента

Ниже (Рис. 3.9) 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 3.9а показаны ошибки для концевого эффектора диаметром 2 мм, а на рисунке 3.9б — для концевого эффектора диаметром 8 мм.

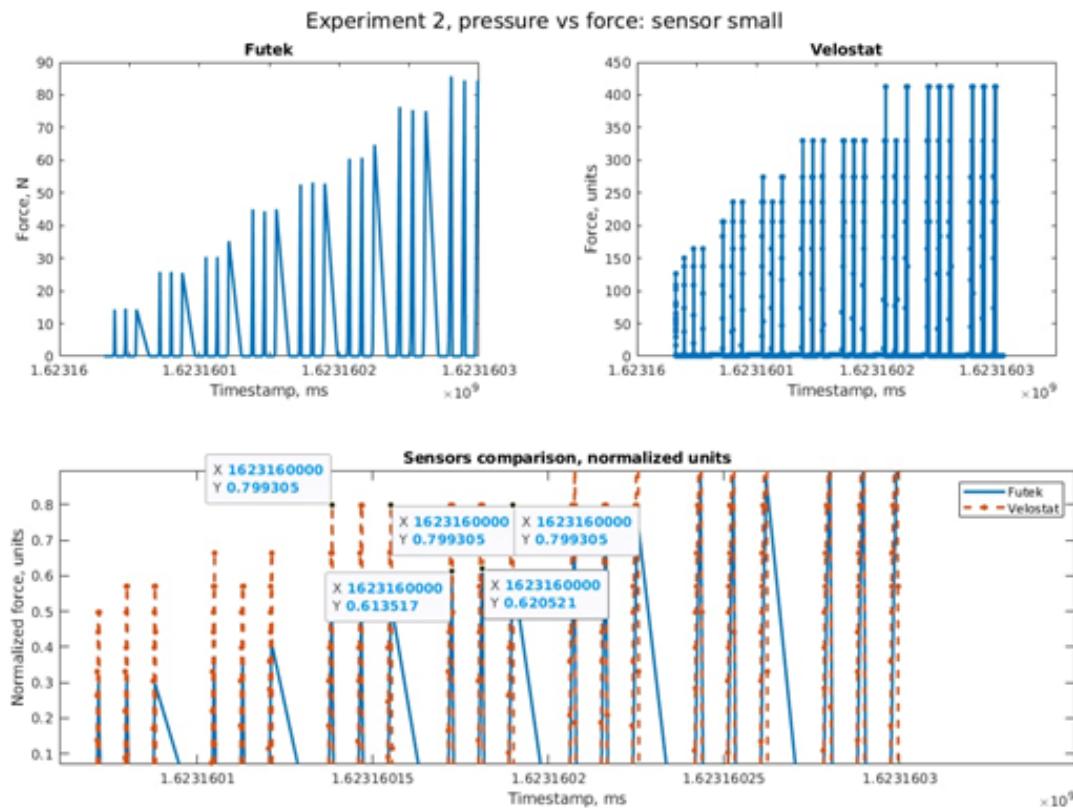
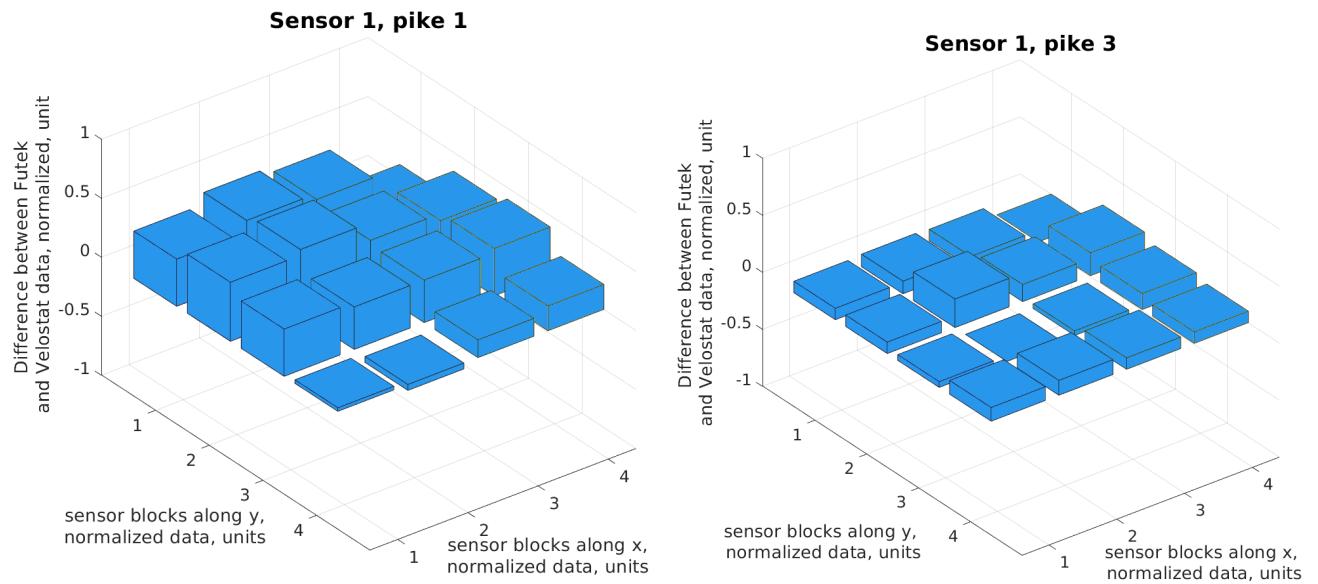


Рисунок 3.8 — Проверка чувствительности датчика. Слева - идеальные данные, справа - результат, полученный с помощью созданного датчика.

Можно заметить, что в 3.9б 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.



а) диаметр концевого эффектора равный б) Диаметр концевого эффектора равный  
2 мм 8 мм

Рисунок 3.9 — Динамический эксперимент

По результатам исследований показано, что характеристики преобразователя удовлетворяют требованиям к системе тактильного восприятия шагающего робота, когда ожидаемый размер площади контакта превышает половину размера преобразователя.

## Глава 4. Разработка метода тактильного ощущения

Четвертая глава раскрывает детали создания алгоритма построения карты с помощью тактильного ощущения, определения типа поверхности.

### 4.1 Картографирование с помощью ощупывания 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. 4.1) (вогнутая оболочка (Рис. 4.5)). На ее основе получается необходимое плотное облако точек (Рис. 4.3в).

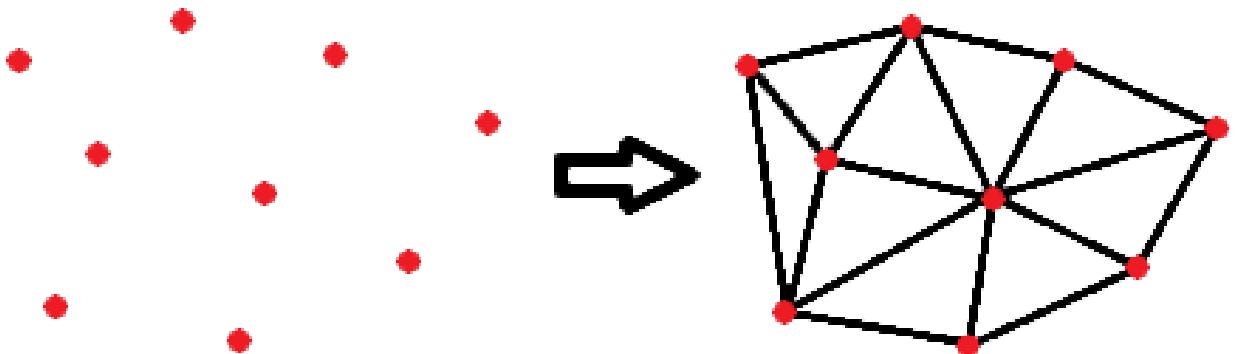
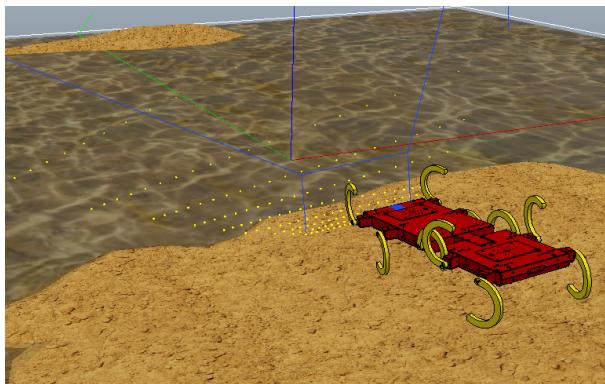
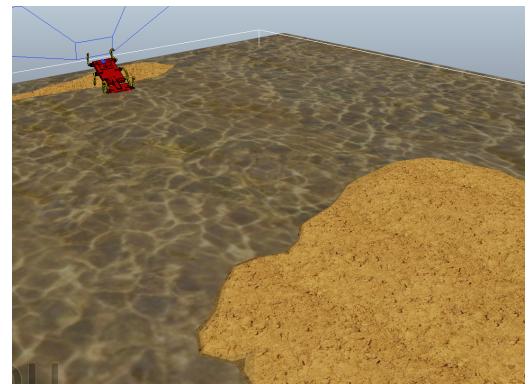


Рисунок 4.1 — 2D Триангуляция Делоне (выпуклая оболочка)

Реализованный алгоритм проверялся, как в симуляции (Рис. 2, 4.2), так и на реальном роботе (Рис. 4.7). Видео



а) Начало движения



б) Конец движения

Рисунок 4.2 — Эксперимент в симуляторе

Ниже представлены полученные результаты (Рис. 4.3). Для оценки точности полученных данных использовались метрики C2C (4.1) и C2M (Рис. 4.6).

$$d_H(X, Y) = \sup_{m \in M} \{ |\text{dist}_X(m) - \text{dist}_Y(m)| \} \quad (4.1)$$

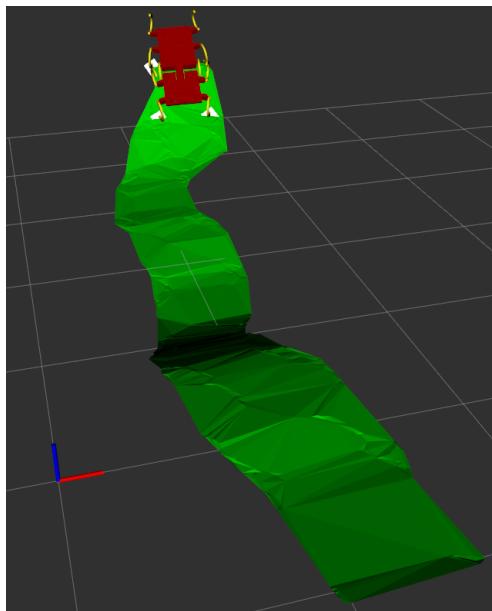
Где  $X, Y$  – непустые подмножества метрического пространства  $M$ ;  $\text{dist}_X: M \rightarrow \mathbb{R}$  – обозначает функцию расстояния до множества  $X$ .

На рисунке 4.5 проиллюстрирована важность модификации триангуляции Делоне. Как можно заметить (Рис. 4.5б) алгоритм построил карту местности там, где робот не ходил и стоит стена. При использовании вогнутой оболочки (Рис. 4.5в) данная проблема не наблюдается.

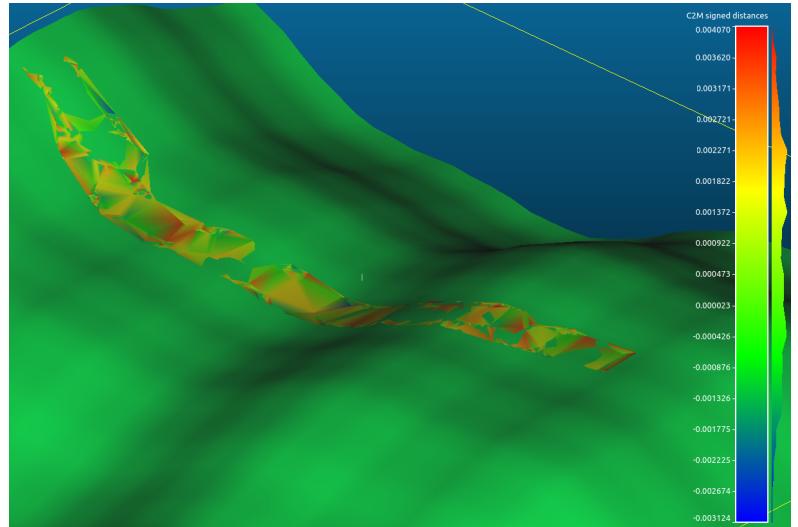
Как итог, среднеквадратичная ошибка для C2C метрики была в среднем равна 5 см. А для C2M 1 см. В натурном эксперименте среднеквадратичная ошибка по метрике C2C получился 8 см.

## 4.2 Определение типа поверхности

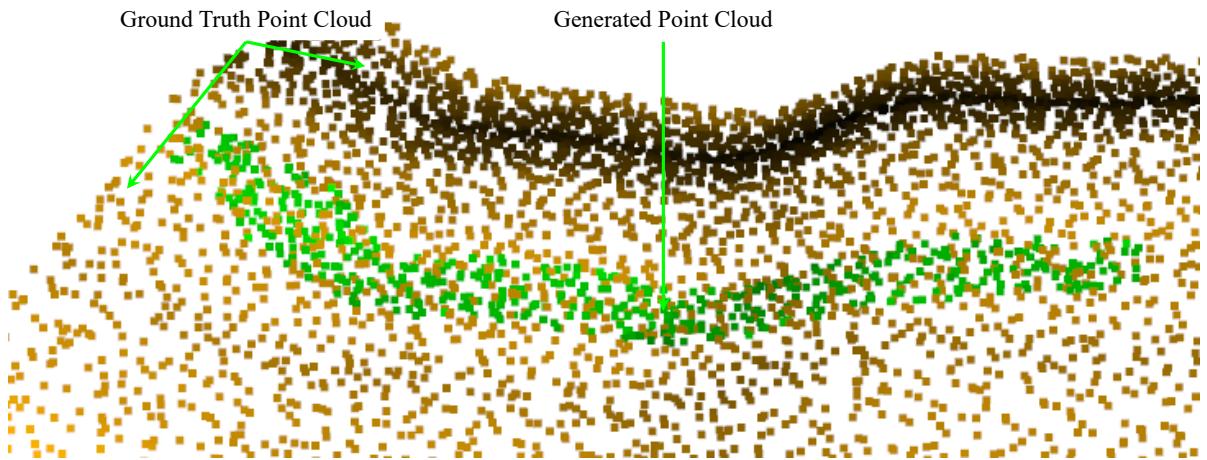
Задачу определения типа поверхности можно определить следующим образом. Робот идет по поверхности, и собирает данные с датчиков силы, с момента на моторе и IMU. На основе предварительного обучения, данные обрабатываются



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



б) Наложенные полигональные сетки

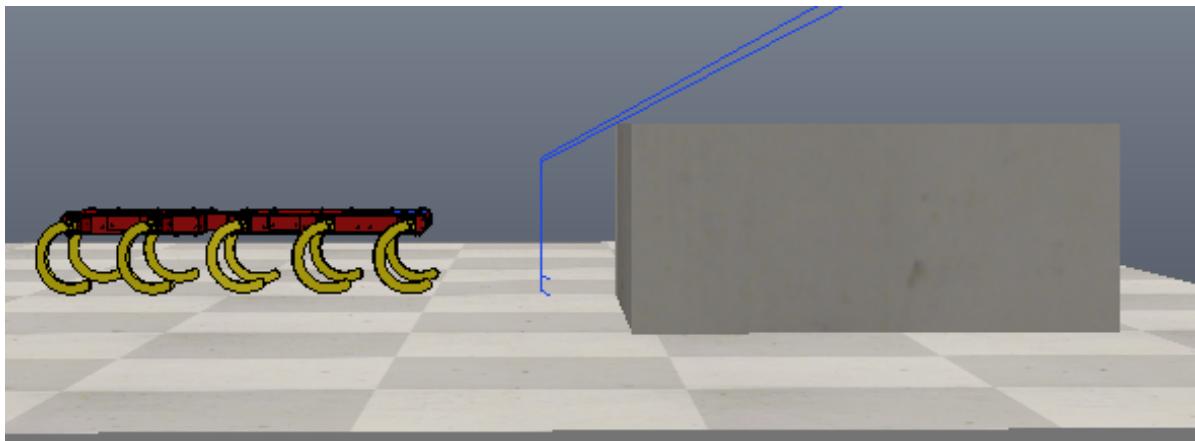


в) Наложенные облака точек

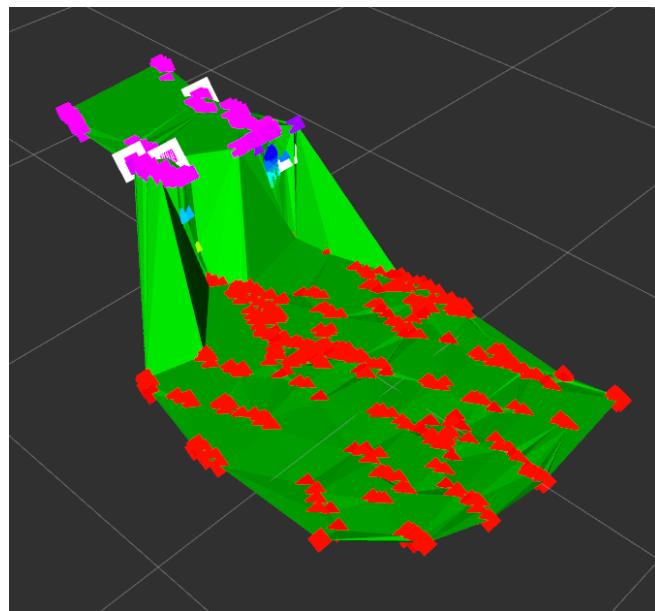
Рисунок 4.3 — Результат эксперимента

и кластеризуются, на основе предварительно определенной базе знаний территорий.

Задачу обучения удобнее всего проводить в лабораторных условиях. Экспериментальная установка соответствует следующим требованиям: возможность установить новые поверхности 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.



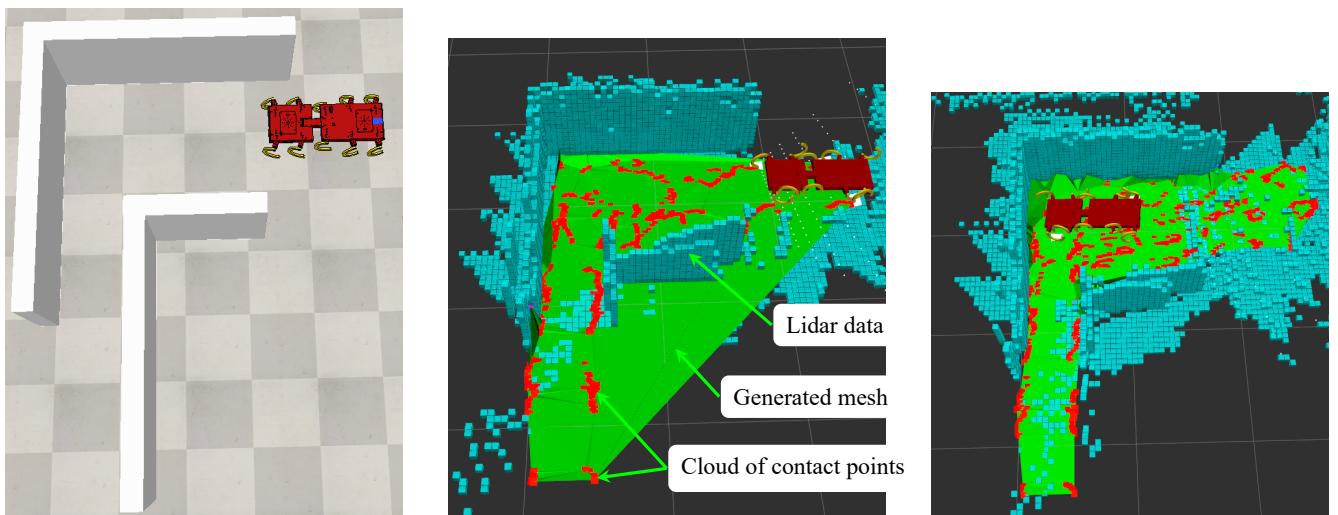
а) Результат эксперимента по построению карты постамента, симулятор



б) Результат эксперимента по построению карты постамента, Rviz,  
полигональная сетка

Рисунок 4.4 — Результат эксперимента по построению карты постамента

Все это было достигнуто благодаря разборному экспериментальному столу и 2ух степенному механизму, который ходит по окружности (Рис. 4.8a). Для бесконечного движения пришлось соединить две ноги робота в одну. На рисунке ниже (Рис. 4.8б) показаны как установлены сенсоры на получившейся ноге.



а) Пример поля

б) Выпуклая оболочка

в) Вогнутая оболочка

Рисунок 4.5 — Объяснение необходимости модификации алгоритма Делоне

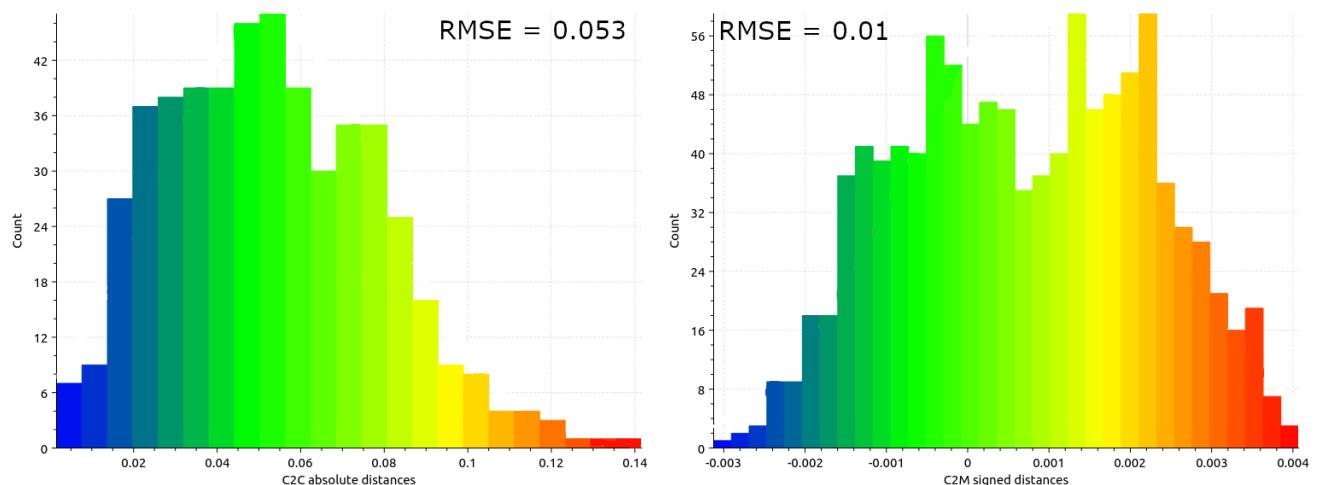
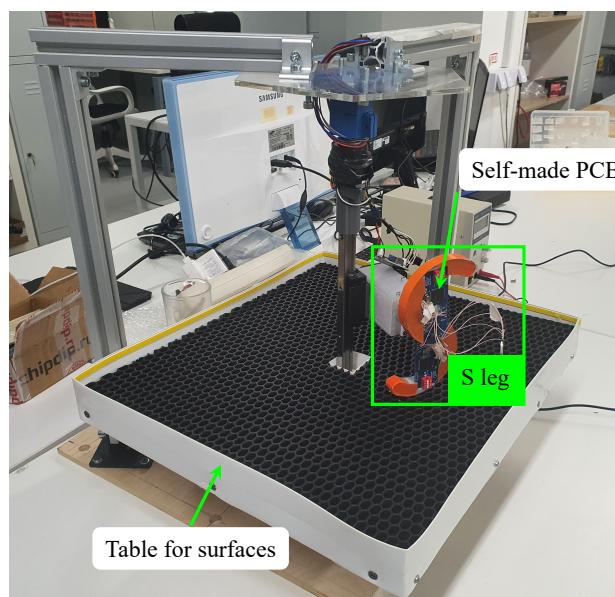
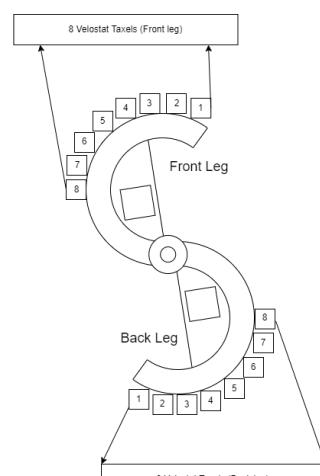
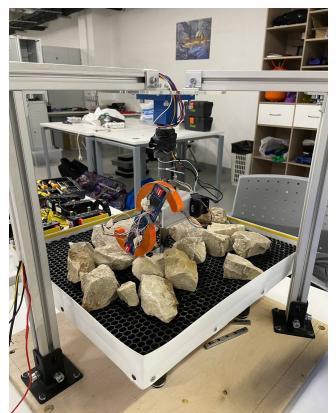
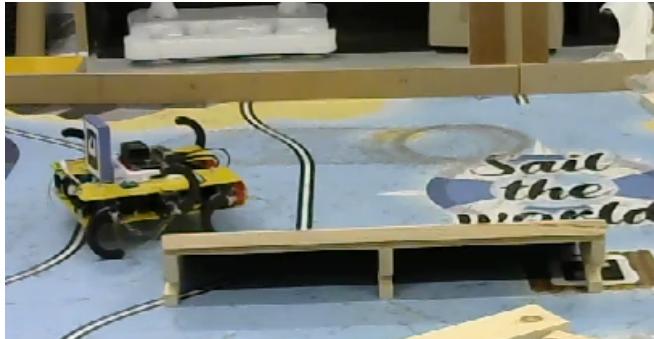
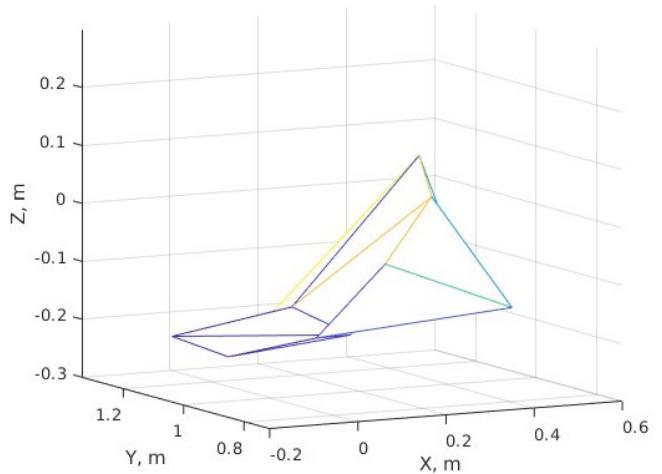
а) Метрика С2С: гистограмма ошибок  
(абсолютное расстояние от точки до  
ближайшей реферальной точки)б) Метрика С2М: Гистограмма ошибок  
(относительное расстояние от точки до  
ближайшей реферальной точки)

Рисунок 4.6 — Метрики оценки точности полученной карты

а) Общий вид экспериментальной  
установкиб) Пояснение по  
расположениюв) Каменистая  
поверхность



а) Робот проходит препятствие



б) Полученная полигональная сетка

Рисунок 4.7 — Пример натурного эксперимента

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

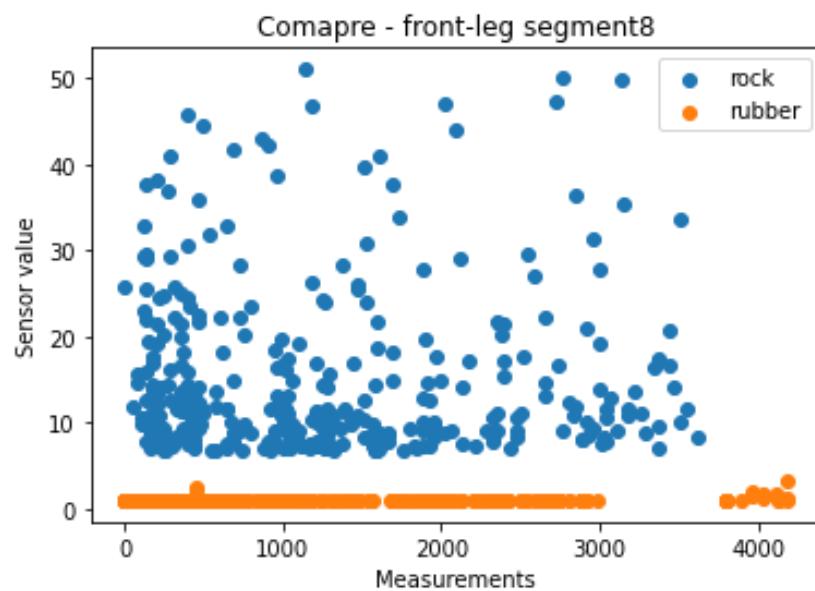
(Рис. 4.8а)



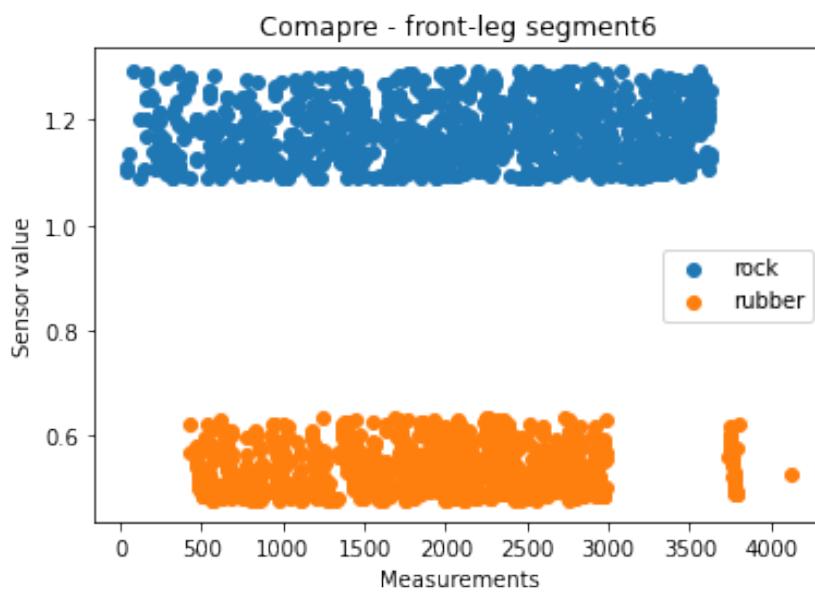
, камень (Рис. 4.8в)



Ниже (Рис. 4.9) 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

Рисунок 4.9 — Сравнение сырых данных после эксперимента с разных сегментов ноги

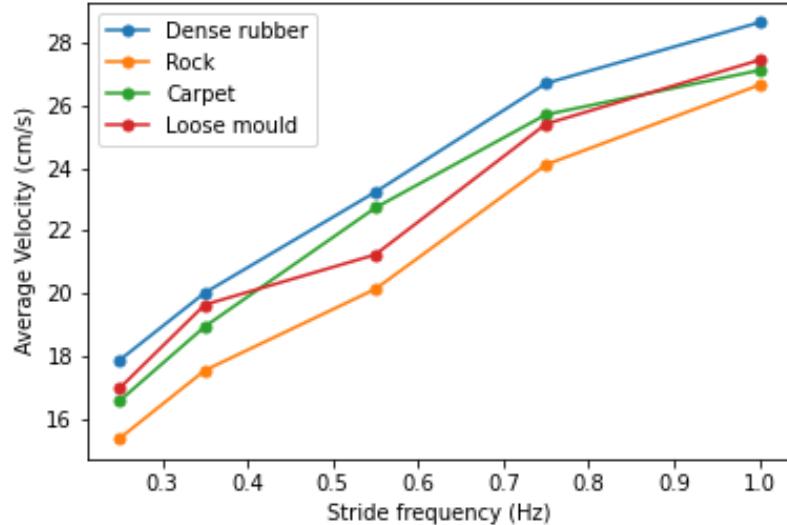


Рисунок 4.10 — Средняя линейная скорость робота

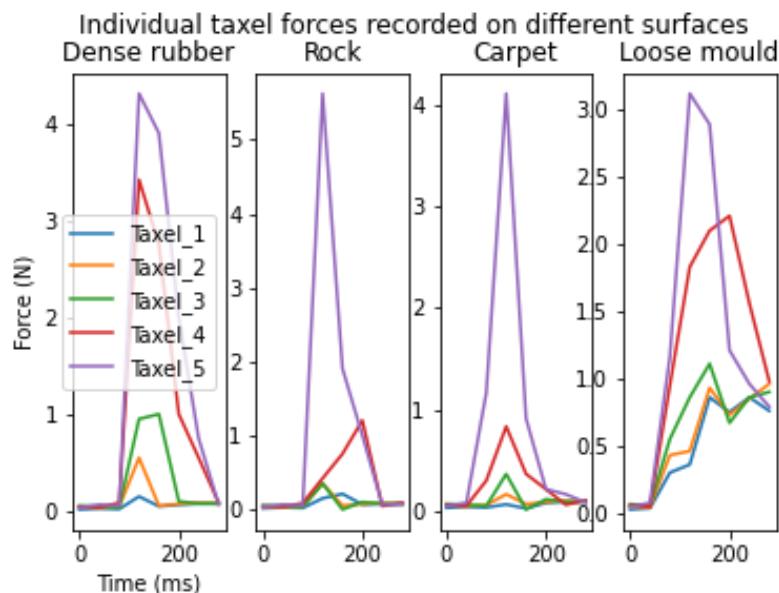


Рисунок 4.11 — Запись активных такселей на разных поверхностях

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 метода тактильного очуствления для мобильного шагающего робота в закрытых пространствах естественного или искусственного происхождения.

При проведении исследований и разработок в диссертационной работе получены следующие результаты, обладающие научной новизной:

1. метод оптимизации конструкции многоногих роботов;
2. разработанная методика исследования датчика силы, когда площадь нажатия на сенсор меньше самого сенсора;
3. реализация программно-алгоритмического обеспечения, позволяющего определять тип поверхности;
4. методика построения карты местности с помощью датчиков силы, установленных на ногах робота.

**Доказана** возможность построения карты местности и определения типа поверхности с помощью тактильного очуствления 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 рассматривать как единое тело, при площади нажатия больше 50% площади сенсора.

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

## Список сокращений и условных обозначений

$\alpha, \beta$	значения ориентации по крену и шагу, см. (2.2), стр. 31
$\beta$	адаптивный параметр, см. (2.1), стр. 25
$\delta$	пройденная дистанция, см. (2.1), стр. 25
$\text{dist}_X: M \rightarrow \mathbb{R}$	обозначает функцию расстояния до множества $X$ , см. (4.1), стр. 50
$\omega_i$	весовой коэффициент для каждого направления, см. (2.2), стр. 31
$i = \{1,2,3,4\}$	среднее значение а, которое принимается из 1 - движение вперед, 2 - движение влево, 3 - движение вправо, 4 - вращение, см. (2.2), стр. 31
$p, A_i, B_i, \tau_{res}, k_i$	настраиваемые константы, см. (3.12), стр. 45
$t$	текущее время, см. (3.12), стр. 45
$t_0$	время начала нажатия, см. (3.12), стр. 45
$V_0$	начальное напряжение, см. (3.12), стр. 45
$X, Y$	непустые подмножества метрического пространства $M$ , см. (4.1), стр. 50
$Z$	положение по оси Z, см. (2.2), стр. 31
$\omega_{1,2} \in [0..1]$	весовые коэффициенты, см. (2.1), стр. 25
$\omega_{z,roll,pitch}$	весовые коэффициенты, см. (2.2), стр. 31

## Словарь терминов

**IMU** : Inertial Measurement Unit (инерциальное измерительное устройство)

**ROS** : Robotics Operative System

**Локомоция** : Перемещение животных в пространстве

**ROS** : Один из способов локомоции человека и животных

**SLAM** : Simultaneous Localization and Planning (Одновременная локализация и планирование)

**F/T** : Force/Torque sensor (датчик силы и момента)

## Список литературы

1. SmartCaveDrone: 3D cave mapping using UAVs as robotic co-archaeologists [Текст] / G. Zhang [и др.] // 2017 International Conference on Unmanned Aircraft Systems, ICUAS 2017. — 2017.
2. Karst terrain in the western upper Galilee, Israel: Speleogenesis, hydrogeology and human preference of Manot Cave [Текст] / A. Frumkin [и др.] // Journal of Human Evolution. — 2019. — Июнь. — С. 102618.
3. Duckiefloat: a Collision-Tolerant Resource-Constrained Blimp for Long-Term Autonomy in Subterranean Environments [Текст] / Y.-W. Huang [и др.]. — 2019.
4. *Vaquero T., Troesch M., Chien S.* An Approach for Autonomous Multi-rover Collaboration for Mars Cave Exploration : Preliminary Results [Текст] // International Symposium on Artificial Intelligence and Robotics & Automation in Space. — 2018.
5. Flying, Hopping Pit-Bots for Cave and Lava Tube Exploration on the Moon and Mars [Текст] / J. Thangavelautham [и др.]. — 2017. — Янв.
6. A campaign in autonomous mine mapping [Текст] / C. Baker [и др.] // Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation. — 2004.
7. Recent developments in subterranean robotics [Текст] / A. Morris [и др.] // Journal of Field Robotics. — 2006.
8. *Максимович Г. А.* Карст [Текст]. — 1960.
9. *Максимович Г.* Основы карстоведения: Том I. Вопросы морфологии карста, спелеологии и гидрогеологии карста [Текст]. — Пермское книжное издательство, 1963.
10. *Максимович Г. А.* Основы Карстоведения Том 2 [Текст]. — 1969.
11. *Максимович Г. А., Лобанов Ю. Е.* Пещеры Урала [Текст]. — 1971.
12. A multi-modal mapping unit for autonomous exploration and mapping of underground tunnels [Текст] / F. Mascarich [и др.] // IEEE Aerospace Conference Proceedings. — 2018.

13. Case studies of a borehole deployable robot for limestone mine profiling and mapping [Текст] / A. Morris [и др.] // Springer Tracts in Advanced Robotics. — 2006.
14. A Brief Overview of a Novel, Highly-Integrated Hydraulic Servo Actuator with Additive-Manufactured Titanium Body [Текст] / C. Semini [и др.] // IROS Workshop 2016. — 2016.
15. Autonomous aerial robotic exploration of subterranean environments relying on morphology-aware path planning [Текст] / C. Papachristos [и др.] // 2019 International Conference on Unmanned Aircraft Systems, ICUAS 2019. — 2019.
16. Vision-Controlled Micro Flying Robots [Текст] / B. D. Scaramuzza [и др.] // Robotics & Automation Magazine, IEEE. — 2014.
17. MAV navigation through indoor corridors using optical flow [Текст] / S. Zingg [и др.] // Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation. — 2010.
18. *Tan N., Mohan R. E., Elangovan K.* Scorpio: A biomimetic reconfigurable rolling–crawling robot [Текст] // International Journal of Advanced Robotic Systems. — 2016. — Сент. — Т. 13, № 5. — С. 172988141665818.
19. *Lynch D. J., Lynch K. M., Umbanhower P. B.* The Soft Landing Problem: Minimizing Energy Loss by a Legged Robot Impacting Yielding Terrain [Текст]. — 2019. — Сент.
20. *Molyneaux L., Carnegie D. A., Chitty C.* HADES: An underground mine disaster scouting robot [Текст] // SSRR 2015 - 2015 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics. — 2016.
21. *Reddy A. H., Kalyan B., Murthy C. S.* Mine Rescue Robot System – A Review [Текст] // Procedia Earth and Planetary Science. — 2015.
22. Development of a 3D snake-like robot: Perambulator-II [Текст] / C. Ye [и др.] // Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, ICMA 2007. — 2007.
23. *Borenstein J., Hansen M., Borrell A.* The OmniTread OT-4 serpentine robot - Design and performance [Текст] // Journal of Field Robotics. — 2007.
24. Hopping mobility concept for search and rescue robots [Текст] / S. Dubowsky [и др.] // Industrial Robot. — 2008.

25. Graph-based Path Planning for Autonomous Robotic Exploration in Subterranean Environments [Текст] / T. Dang [и др.] // 2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). — IEEE, 11.2019. — C. 3105—3112.
26. *Chen J. Y.* UAV-guided navigation for ground robot tele-operation in a military reconnaissance environment [Текст] // Ergonomics. — 2010.
27. UAV/UGV cooperation for surveying operations in humanitarian demining [Текст] / L. Cantelli [и др.] // 2013 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics, SSRR 2013. — 2013.
28. *Schmidt D., Berns K.* Climbing robots for maintenance and inspections of vertical structures - A survey of design aspects and technologies [Текст] // Robotics and Autonomous Systems. — 2013.
29. LEMUR 3: A limbed climbing robot for extreme terrain mobility in space [Текст] / A. Parness [и др.] // Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation. — 2017.
30. Combot: Compliant climbing robotic platform with transitioning capability and payload capacity [Текст] / G. Lee [и др.] // Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation. — 2012.
31. *Tavakoli M., Marques L., De Almeida A. T.* OmniClimber: An omnidirectional light weight climbing robot with flexibility to adapt to non-flat surfaces [Текст] // IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems. — 2012.
32. *Kotay K. D., Rus D. L.* Navigating 3D steel web structures with an inchworm robot [Текст] // IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems. — 1996.
33. Design and optimization of a magnetic wheel for a grit-blasting robot for use on ship hulls [Текст] / Z. Xu [и др.] // Robotica. — 2017.
34. *Li J., Xu T., Zhang K.* Real-Time Feature-Based Video Stabilization on FPGA [Текст] // IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology. — 2017. — Апр. — Т. 27, № 4. — С. 907—919.
35. *Nagakubo A., Hirose S.* Walking and running of the quadruped wall-climbing robot [Текст] // Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation. — 1994.

36. *Tlale N.* A MODULAR DESIGN OF A WALL-CLIMBING ROBOT AND ITS MECHATRONICS CONTROLLER [Текст] // The South African Journal of Industrial Engineering. — 2012.
37. Free-climbing with a multi-use robot [Текст] / T. Bretl [и др.] // Springer Tracts in Advanced Robotics. — 2006.
38. SpinybotII: climbing hard walls with compliant microspines [Текст] / Sangbae Kim [и др.] // . — 2005.
39. *Sintov A., Avramovich T., Shapiro A.* Design and motion planning of an autonomous climbing robot with claws [Текст] // Robotics and Autonomous Systems. — 2011.
40. *Savin S., Vorochaeva L.* Footstep planning for a six-legged in-pipe robot moving in spatially curved pipes [Текст] // 2017 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). — IEEE, 06.2017. — C. 1—6.
41. Field-hardened Robotic Autonomy for Subterranean Exploration [Текст] / T. Dang [и др.]. — 2019.
42. *Fairfield N., Kantor G., Wettergreen D.* Towards particle filter SLAM with three dimensional evidence grids in a flooded subterranean environment [Текст] // Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation. — 2006.
43. Terrain trafficability analysis and soil mechanical property identification for planetary rovers: A survey [Текст] / S. Chhaniyara [и др.]. — 2012.
44. Mine Tunnel Exploration using Multiple Quadrupedal Robots [Текст] / I. D. Miller [и др.]. — 2019.
45. *Wei J., Ma H.-w.* Study on Mine Rescue Robot System [Текст] // . — 2009. — C. 1065—1072.
46. DeepGait: Planning and Control of Quadrupedal Gaits using Deep Reinforcement Learning [Текст] / V. Tsounis [и др.]. — 2019.
47. Sensitive dependence of the motion of a legged robot on granular media [Текст] / C. Li [и др.] // Proceedings of the National Academy of Sciences. — 2009. — Март. — Т. 106, № 9. — С. 3029—3034.
48. Rolling in the Deep – Hybrid Locomotion for Wheeled-Legged Robots using Online Trajectory Optimization [Текст] / M. Bjelonic [и др.]. — 2019.

49. Trajectory optimization for wheeled-legged quadrupedal robots using linearized ZMP constraints [Текст] / Y. De Viragh [и др.] // IEEE Robotics and Automation Letters. — 2019.
50. Walking Posture Adaptation for Legged Robot Navigation in Confined Spaces [Текст] / R. Buchanan [и др.] // IEEE Robotics and Automation Letters. — 2019.
51. Integrated Ground Reaction Force Sensing and Terrain Classification for Small Legged Robots [Текст] / X. A. Wu [и др.] // IEEE Robotics and Automation Letters. — 2016. — Июль. — Т. 1, № 2. — С. 1125—1132.
52. Tactile Sensing and Terrain-Based Gait Control for Small Legged Robots [Текст] / X. A. Wu [и др.] // IEEE Transactions on Robotics. — 2020. — Февр. — Т. 36, № 1. — С. 15—27.
53. Robotic tactile perception of object properties: A review [Текст] / S. Luo [и др.] // Mechatronics. — 2017. — Дек. — Т. 48, November. — С. 54—67.
54. *Малолетов А. В. Динамика и оптимизация структуры, параметров и алгоритмов управления движением шагающих машин со сдвоенными шагающими двигателями* [Текст] : дис. ... канд. / Малолетов Александр Васильевич. — Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук Волгоград, 2015.
55. Rhex: A biologically inspired hexapod runner [Текст] / R. Altendorfer [и др.] // Autonomous Robots. — 2001. — Т. 11, № 3. — С. 207—213.
56. *Miller L. Extreme Makeover for a Heian-Era Wizard* [Текст] // Mechademia. — 2008. — Т. 3, № 1. — С. 30—45.
57. Quattroped: A Leg–Wheel Transformable Robot [Текст] / S.-C. Chen [и др.] // IEEE/ASME Transactions On Mechatronics. — 2014. — Т. 19, № 2. — С. 730—742.
58. TurboQuad: A Novel Leg–Wheel Transformable Robot With Smooth and Fast Behavioral Transitions [Текст] / W.-H. Chen [и др.] // IEEE Transactions on Robotics. — 2017. — Т. 33, № 5. — С. 1025—1040.
59. Comparing cockroach and Whegs robot body motions [Текст] / R. T. Schroer [и др.] // Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA'04. 2004 IEEE International Conference on. Т. 4. — IEEE. 2004. — С. 3288—3293.

60. *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.
61. DEAP: Evolutionary algorithms made easy [Текст] / F.-A. Fortin [и др.] // Journal of Machine Learning Research. — 2012. — T. 13, Jul. — C. 2171—2175.
62. Integrated Ground Reaction Force Sensing and Terrain Classification for Small Legged Robots [Text] / X. A. Wu [et al.] // IEEE Robotics and Automation Letters. — 2016. — July. — Vol. 1, no. 2. — P. 1125—1132.
63. *Walas K.* Terrain Classification and Negotiation with a Walking Robot [Text] // Journal of Intelligent & Robotic Systems. — 2015. — June. — Vol. 78, no. 3/4. — P. 401—423.
64. *Mrva J., Faigl J.* Feature Extraction for Terrain Classification with Crawling Robots [Text]. — 2015.
65. Learning terrain types with the Pitman-Yor process mixtures of Gaussians for a legged robot [Текст] / P. Dallaire [и др.] // 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). — Hamburg, Germany : IEEE, 09.2015. — C. 3457—3463.
66. Tactile Sensing and Terrain-Based Gait Control for Small Legged Robots [Text] / X. A. Wu [et al.] // IEEE Transactions on Robotics. — 2020. — Feb. — Vol. 36, no. 1. — P. 15—27.
67. Automated gait adaptation for legged robots [Text] / J. Weingarten [et al.] // IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA '04. 2004. — New Orleans, LA, USA : IEEE, 2004. — 2153—2158 Vol.3.
68. *Odenthal D., Bunte T., Ackermann J.* Nonlinear steering and braking control for vehicle rollover avoidance [Текст] // 1999 European Control Conference (ECC). — Karlsruhe : IEEE, 08.1999. — C. 598—603.
69. *Peters S., Iagnemma K.* An analysis of rollover stability measurement for high-speed mobile robots [Текст] // Proceedings 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006. — Orlando, FL, USA : IEEE, 2006. — C. 3711—3716.

70. *Saranli U., Buehler M., Koditschek D.* Design, modeling and preliminary control of a compliant hexapod robot [Text] // Proceedings 2000 ICRA. Millennium Conference. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Symposia Proceedings (Cat. No.00CH37065). Vol. 3. — San Francisco, CA, USA : IEEE, 2000. — P. 2589—2596.
71. *Libby J., Stentz A. J.* Using sound to classify vehicle-terrain interactions in outdoor environments [Текст] // 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation. — St Paul, MN, USA : IEEE, 05.2012. — C. 3559—3566.
72. Terrain characterization and classification with a mobile robot [Text] / L. Ojeda [et al.] // Journal of Field Robotics. — 2006. — Feb. — Vol. 23, no. 2. — P. 103—122.
73. *Howe R., Cutkosky M.* Dynamic tactile sensing: perception of fine surface features with stress rate sensing [Текст] // IEEE Transactions on Robotics and Automation. — 1993. — Apr. — T. 9, № 2. — C. 140—151.
74. *Saranli U., Buehler M., Koditschek D. E.* RHex: A Simple and Highly Mobile Hexapod Robot [Text] // The International Journal of Robotics Research. — 2001. — July. — Vol. 20, no. 7. — P. 616—631.
75. Comparing cockroach and Whegs robot body motions [Текст] / R. Schroer [и др.] // IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA '04. 2004. — New Orleans, LA, USA : IEEE, 2004. — 3288—3293 Vol.4.
76. *Bulichev O., Klimchik A.* Concept Development Of Biomimetic Centipede Robot StriRus [Text] // 2018 23rd Conference of Open Innovations Association (FRUCT). — Bologna : IEEE, 11/2018. — P. 85—90.
77. *Vehc I., Livovsky L.* Flexible Resistive Sensor Based on Velostat [Текст] // 2020 43rd International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE). — Demanovska Valley, Slovakia : IEEE, 05.2020. — C. 1—6.
78. *Буличев О. В.* Использование Robot Operating System (ROS) для планирования автономного перемещения мобильного робототехнического комплекса [Текст] // Молодежный научно-технический вестник. — 2016. — № 10. — С. 7.

79. 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.
80. 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.
81. Буличев О. В., Ахметшин А. А. ПРЯМОЛИНЕЙНОЕ ДВИЖЕНИЕ ВСЕНАПРАВЛЕННОГО МНОГОНОГОШАГАЮЩЕГО 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.
82. Буличев О. В. Нахождение реакций опор ног роботизированной платформы с поворотными цикловыми двигателями и составным корпусом [Текст].
83. Буличев О. В. Стабилизация видео на основе IMU-датчика и 3D облака точек для многоногого робота типа многоножки [Текст].
84. Буличев О. В., Малолетов А. В. Моделирование движения роботизированной платформы в условиях трудной проходимости с определением рельефа опорной поверхности [Текст].
85. Буличев О. В. Разработка экспериментального стенда для автоматизации проверки датчиков чувствования [Текст].
86. 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.
87. Программа построения 3D - карты местности с помощью многоногого биомиметического шагающего робота с использованием фреймворка ROS [Текст] / О. Буличев.
88. Программа управления экспериментальным стендом для автоматизации проверки датчиков чувствования [Текст] / О. Буличев.

89. 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.
90. 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.
91. Sokolov M., Bulichev O., Afanasyev I. Analysis of ROS-based Visual and Lidar Odometry for a Teleoperated Crawler-type Robot in indoor environment [Текст] // Proc. Int. Conf. on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO). — 2017.
92. Программа Обучения Робота Шаговым Движениям [Текст] : пат. 2019661399 Russia / О. Буличев. — Заявл. 28.08.2019.
93. Программа планирования траектории движения ног двенадцатиногого робота с использованием фреймворка ROS [Текст] : пат. 2020665488 Russia / О. Буличев. — Заявл. 27.11.2020.
94. Программа подбора кинематических параметров у шагающих роботов [Текст] : пат. 2019660557 Russia / О. Буличев. — Заявл. 07.08.2019.
95. Программа позиционирования и стабилизации камеры для шагающего робота Стрирус [Текст] : пат. 2019665435 Russia / О. Буличев, Д. Бураков. — Заявл. 22.11.2019.
96. Программа управления звеньями шагающего двенадцатиногого робота с помощью геймпада в робототехническом симуляторе Ignition [Текст] : пат. 2020665643 Russia / О. Буличев, А. Ахметшин. — Заявл. 27.11.2020.

### **Публикации автора по теме диссертации**

### **В изданиях из списка ВАК РФ**

89. 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**

60. 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.
90. 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.

### **Зарегистрированные программы для ЭВМ**

87. Программа построения 3D - карты местности с помощью многоугольного биомиметического шагающего робота с использованием фреймворка ROS [Текст] / О. Буличев.
88. Программа управления экспериментальным стендом для автоматизации проверки датчиков очувствления [Текст] / О. Буличев.
92. Программа Обучения Робота Шаговым Движениям [Текст] : пат. 2019661399 Russia / О. Буличев. — Заявл. 28.08.2019.
93. Программа планирования траектории движения ног двенадцатиногого робота с использованием фреймворка ROS [Текст] : пат. 2020665488 Russia / О. Буличев. — Заявл. 27.11.2020.
94. Программа подбора кинематических параметров у шагающих роботов [Текст] : пат. 2019660557 Russia / О. Буличев. — Заявл. 07.08.2019.
95. Программа позиционирования и стабилизации камеры для шагающего робота Стрирус [Текст] : пат. 2019665435 Russia / О. Буличев, Д. Бураков. — Заявл. 22.11.2019.
96. Программа управления звеньями шагающего двенадцатиногого робота с помощью геймпада в робототехническом симуляторе Ignition [Текст] : пат. 2020665643 Russia / О. Буличев, А. Ахметшин. — Заявл. 27.11.2020.

## В прочих изданиях

78. *Буличев О. В.* Использование Robot Operating System (ROS) для планирования автономного перемещения мобильного робототехнического комплекса [Текст] // Молодежный научно-технический вестник. — 2016. — № 10. — С. 7.
79. *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.
80. *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.
81. *Буличев О. В., Ахметшин А. А.* ПРЯМОЛИНЕЙНОЕ ДВИЖЕНИЕ ВСЕНАПРАВЛЕННОГО МНОГОНОГО 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.
82. *Буличев О. В.* Нахождение реакций опор ног роботизированной платформы с поворотными цикловыми двигателями и составным корпусом [Текст].
83. *Буличев О. В.* Стабилизация видео на основе IMU-датчика и 3D облака точек для многоногого робота типа многоножки [Текст].
84. *Буличев О. В., Малолетов А. В.* Моделирование движения роботизированной платформы в условиях трудной проходимости с определением рельефа опорной поверхности [Текст].
85. *Буличев О. В.* Разработка экспериментального стенда для автоматизации проверки датчиков чувствования [Текст].
86. *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.

## Список рисунков

1	Препятствия, встречающиеся в пещерах . . . . .	4
2	Пример ситуации, где навигация, основанная на камере или лидаре построит неправильную карту . . . . .	5
3	Прототип, на котором было сделано большинство экспериментов . . .	6
1.1	Твердые поверхности . . . . .	10
1.2	Сыпучие грунты . . . . .	10
1.3	Водяные препятствия . . . . .	11
1.4	Скользящие поверхности . . . . .	11
1.5	Размеры пещер . . . . .	12
1.6	Boston Dynamics робот RHex . . . . .	19
1.7	Gakken Mechamo Centipede робот . . . . .	19
1.8	Quattroped семья роботов . . . . .	19
1.9	Whegs II робот . . . . .	20
2.1	Схема модели робота для генетического алгоритма . . . . .	25
2.2	Три диапазона для оценки рельефа местности . . . . .	26
2.3	Робот с результирующими результатами . . . . .	29
2.4	Среднее значение фитнес-функции $\pm \text{std}$ на поколение Минимальное и максимальное значения фитнес-функции на поколение . . . . .	29
2.5	Примеры сгенерированных территорий . . . . .	30
2.6	Данные о положении для обоих типов движения . . . . .	32
2.7	RMS из данных об ориентации для типа движения вперед . . . . .	32
2.8	STD из данных об ориентации для типа движения вперед . . . . .	33
2.9	из данных об ориентации для типа движения вбок . . . . .	33
2.10	Векторное представление сил в классическом и всенаправленном состоянии . . . . .	34
2.11	Итерации робота СтриРуса . . . . .	36
3.1	Примеры использования Velostat . . . . .	40
3.2	Электрическая схема преобразователя силы . . . . .	41
3.3	График зависимости прикладываемого веса от сопротивления . . . . .	42
3.4	Разработанный экспериментальный стенд . . . . .	43
3.5	Представление места нажатия инструментом сенсора и сам инструмент	44

3.6	Графики зависимости силы и позиции по $z$ от времени во время эксперимента по исследованию Velostat . . . . .	45
3.7	Результаты статического эксперимента . . . . .	46
3.8	Проверка чувствительности датчика. Слева - идеальные данные, справа - результат, полученный с помощью созданного датчика. . . . .	47
3.9	Динамический эксперимент . . . . .	48
4.1	2D Триангуляция Делоне (выпуклая оболочка) . . . . .	49
4.2	Эксперимент в симуляторе . . . . .	50
4.3	Результат эксперимента . . . . .	51
4.4	Результат эксперимента по построению карты постамента . . . . .	52
4.5	Объяснение необходимости модификации алгоритма Делоне . . . . .	53
4.6	Метрики оценки точности полученной карты . . . . .	53
4.8	Экспериментальная установка для определения типа поверхности . . . . .	53
4.7	Пример натурного эксперимента . . . . .	54
4.9	Сравнение сырых данных после эксперимента с разных сегментов ноги . . . . .	55
4.10	Средняя линейная скорость робота . . . . .	56
4.11	Запись активных такселей на разных поверхностях . . . . .	56

**Список таблиц**

1	Классификация МРК . . . . .	17
2	Процентное соотношение между диапазонами и успешными попытками . . . . .	27
3	Зависимость между статистикой значения пригодности и типами ландшафта . . . . .	30
4	Сравнение итераций робота . . . . .	37